



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Trabajo de Fin de Grado

Automatización de un banco de ensayos para la evaluación de articulaciones robóticas flexibles

Grupo VSA - Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Autor:

Luis Alejandro Martín Veloza

Tutor:

José Medina Hernández

Marzo 2016

RESUMEN

Uno de los mayores riesgos de los robots que comparten el espacio de trabajo con el hombre reside en la posibilidad de una colisión inesperada con éste. Son imprescindibles sistemas intrínsecamente seguros que permitan garantizar la seguridad incluso en estos casos. Los primeros trabajos realizados en este sentido, incluyen los actuadores de rigidez variable (VSA, por sus siglas en inglés: *Variable Stiffness Actuator*). Estos sistemas buscan reducir la fuerza generada en un impacto mediante la adición de un mayor grado de flexibilidad en la estructura del robot. En este estudio, se ha ensayado con los prototipos AVASTT (*Actuator with Variable Stiffness and Torque Thresold*) y MMJS (*Mechanism of Multiple Joint Stiffness*); dos nuevos VSA, cuyos diseños conceptuales los diferencian del resto de actuadores conocidos.

Para ello, el trabajo de fin de grado que se presenta a continuación, se centró en el diseño, construcción e implementación de la automatización de un banco de ensayos para ambos dispositivos. Contando con el mecanismo ya instalado, se planteó tanto la lógica del control electrónico como la adquisición de los datos procedentes de la instrumentación necesaria para que ambos mecanismos pudieran mantenerse totalmente rígidos mientras no se sobrepasara un cierto valor de carga umbral, siendo este umbral ajustable, según las necesidades de la operación a realizar por el robot.

Para la consecución de dicho objetivo, se utilizó como base el programa LabVIEW, una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Los elementos principales para los que se diseñó el control mencionado fueron los motores instalados para el movimiento principal del robot y la variación de la rigidez; los diferentes acelerómetros integrados tanto en el robot, como en la zona de colisión; los encoders magnéticos para la medición de desplazamientos relativos, y un sensor de fuerza/par para la medida de momentos en la zona de pruebas. Para la correcta monitorización de la abundante información relativa al control, así como la procedente de los diferentes instrumentos de medida, se diseñó un HMI (*Human Machine Interface*) de interacción con el banco.

Por último, se realizaron dos tipos de ensayos. Uno destinado a comprobar el correcto control automático diseñado para el banco, y otro orientado a la obtención de datos al producirse un impacto, con el objetivo de estudiar la contribución de los parámetros característicos del diseño de uno de los actuadores en el daño producido sobre la cabeza de una persona y sobre el propio robot.

Keywords:

Ensayos; LabVIEW; Adquisición datos; Sensor fuerza/par; Acelerómetro; Encoder; Control posición-velocidad-corriente; HMI; JR3; VSA; AVASTT; MMJS; ARV; EPOS.

ÍNDICE

1	PLANTEAMIENTO	14
1.1	INTRODUCCIÓN	14
1.2	MOTIVACIONES Y ORIGEN DEL PROYECTO	16
1.3	OBJETIVOS	18
1.4	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	19
2	ESTADO DEL ARTE DE LOS ACTUADORES CON FLEXIBILIDAD ARTICULAR	20
2.1	INTRODUCCIÓN	20
2.2	ACTUADORES CON FLEXIBILIDAD ARTICULAR	22
2.2.1	CLASIFICACIÓN DE LOS ACTUADORES CON FLEXIBILIDAD ARTICULAR	22
2.2.1.1	Actuador elástico serie	23
2.2.1.2	Actuadores flexibles con rigidez variable	23
	<i>Variación del punto de equilibrio</i>	24
	<i>Configuración antagónica</i>	26
	<i>Variación de la estructura</i>	33
	<i>Variación mecánica</i>	37
2.2.1.3	Embragues con flexibilidad articular	41
2.2.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS DISPOSITIVOS CON FLEXIBILIDAD ARTICULAR	41
2.3	INSTRUMENTACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS ACTUADORES CON FLEXIBILIDAD ARTICULAR	43
2.3.1	SENSORES DE POSICIÓN	44
2.3.2	SENSORES DE FUERZA	46
2.3.3	ACELERÓMETROS	47
2.4	ACTUADORES Y ELECTRÓNICA DE CONTROL PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS ACTUADORES CON FLEXIBILIDAD ARTICULAR	49
2.4.1	MOTOR PRINCIPAL	49
2.4.2	MOTOR SECUNDARIO	51
2.4.3	CONTROLADOR	52
3	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	55
3.1	INTRODUCCIÓN	55
3.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	55
	ESTRUCTURA	56
3.2.1	LA CABEZA DUMMY	58
3.2.2	ACTUADOR DE RIGIDEZ VARIABLE AVASTT	60
3.2.3	EMBRAGUE ELÁSTICO MMJS	64
3.2.4	INSTRUMENTACIÓN Y MONITORIZACIÓN	67
3.2.4.1	Sensores intrínsecos	67

3.2.4.2 Sensores extrínsecos	68
3.2.4.3 Acondicionador de señales	71
3.2.4.4 Sistema de adquisición de datos	74
3.2.5 MOTORES	76
3.2.6 CONTROLADORES EPOS2	78
3.3 CONTROLADOR A BAJO NIVEL	81
3.3.1 MOTOR COMO FUENTE DE PAR	83
3.3.2 MOTOR COMO FUENTE DE POSICIÓN	83
3.3.3 IMPLEMENTACIÓN	84
4 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	86
4.1 INTRODUCCIÓN	86
4.2 REQUERIMIENTOS	86
4.3 DIAGRAMA DE CONCEPTOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA	88
4.4 CONFIGURACIÓN	90
4.4.1 COMUNICACIONES	90
4.4.1.1 Modo de operación	92
4.4.1.2 Parámetros PID	96
4.4.1.3 Parámetros de prealimentación	98
4.4.2 SENSORES	100
4.4.3 CARGA DESDE ARCHIVO	104
4.5 ADQUISICIÓN DE DATOS	107
4.6 ACCIONES Y MOVIMIENTOS	111
4.6.1 MOTOR DE POSICIÓN	111
4.6.1.1 Profile Position Mode (PPM)	111
4.6.1.2 Homing Mode (HM)	114
4.6.1.3 Interpolated Position Mode (IPM)	117
4.6.1.4 Position Mode (PM)	120
4.6.1.5 Profile Velocity Mode (PVM)	122
4.6.1.6 Current Mode (CM)	125
4.6.2 MOTOR DE AJUSTE DE RIGIDEZ	128
4.6.2.1 Profile Position Mode (PPM)	128
4.6.2.2 Homing Mode (HM)	129
4.6.2.3 Interpolated Position Mode (IPM)	130
4.6.2.4 Position Mode (PM)	131
4.6.3 SENSORES EXTRÍNSECOS	131
4.7 MONITOREO DE SENSORES	134
4.7.1 ASOCIADOS AL PC MAESTRO	134
4.7.2 ASOCIADOS AL PC ESCLAVO	136
4.8 GESTIÓN DE ERRORES	139
4.9 PROTOCOLO DE PUESTA EN MARCHA	142
5 RESULTADOS EXPERIMENTALES	148

5.1 INTRODUCCIÓN	148
5.2 ENSAYOS CON AVASTT	148
5.2.1 CONTROL A BAJO NIVEL	148
5.2.1.1 Control de posición	148
<i>Alcance de una posición definida por el operador mediante modo PPM</i>	148
<i>Alcance de una posición definida por el operador mediante modo PM</i>	149
<i>Seguimiento de una señal sinusoidal en modo PM</i>	151
<i>Control de posición por interpolación de puntos en modo IPM</i>	152
<i>Control de posición en modo HM - Current Threshold Positive Speed & Index</i>	153
5.2.1.2 Control de corriente	154
<i>Control en corriente a través del modo CM - Aleatorio</i>	154
<i>Control en corriente a través del modo CM - Lineal</i>	155
<i>Control en corriente a través del modo CM - Constante</i>	156
5.2.1.3 Control de velocidad	157
<i>Control de velocidad a través del modo PVM - DC</i>	157
<i>Control de velocidad a través del modo PVM - AC</i>	159
5.2.2 MONITORIZACIÓN DE INSTRUMENTOS	160
5.3 ANÁLISIS DE COLISIÓN DEL MMJS	161
5.3.1 MONTAJE EXPERIMENTAL	161
5.3.2 EXPLOTACIÓN DE LA DINÁMICA NATURAL	162
5.3.3 ENSAYO DE SEGURIDAD ESTÁTICA	163
5.3.4 ENSAYO DE SEGURIDAD PARA COLISIONES DINÁMICAS	164
6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	166
6.1 CONCLUSIONES	166
6.2 POSIBLES MEJORAS	167
6.3 LÍNEAS DE ACTUACIÓN EN EL FUTURO	168
7 PRESUPUESTO	169
8 BIBLIOGRAFÍA Y APÉNDICES	170
8.1 BIBLIOGRAFÍA	170
8.2 APÉNDICE 1 - LABVIEW	174
8.2.1 SOFTWARE	174
8.2.2 LABVIEW: PROGRAMACIÓN GRÁFICA DE FLUJO DE DATOS	174
8.2.3 HERRAMIENTAS DE DEPURACIÓN INTERACTIVA	175
8.2.4 PARALELISMO EN EL SOFTWARE	177
8.2.5 UNA MANERA MEJOR DE SOLUCIONAR PROBLEMAS	178
8.3 APÉNDICE 2 - INSTALACIÓN SENSOR JR3, INC.	179
8.3.1 INSTALACIÓN DEL SENSOR FUERZA/PAR Y TARJETA PROCESADORA DE SEÑAL JR3, INC.	179
8.3.1.1 Instalación de tarjeta procesadora de señal (PCI) JR3, inc.	179
8.3.1.2 Instalación de driver ActiveX y librería para el sensor JR3, inc. en LabVIEW	182

8.4 APÉNDICE 3 - PLANOS SOFTWARE	184
8.4.1 PLANOS DEL DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA MAESTRO	184
8.4.1.1 Bucle "Principal"	185
8.4.1.2 Bucle "Acciones y Movimientos"	188
8.4.1.3 Bucle "Comunicación"	191
8.4.1.4 Bucle "Controlador"	192
8.4.1.5 Bucle "Motores"	193
8.4.1.6 Bucle "Configuración de Sensores"	194
8.4.1.7 Bucle "Monitoreo de Sensores"	195
8.4.1.8 Bucle "Opciones de Carga"	196
8.4.1.9 Bucle "Limpieza de Errores"	197
8.4.1.10 Bucle "Salir"	198
8.4.2 PLANOS DEL DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA ESCLAVO	199

Índice de Figuras

Figura 1.1: Ejemplo de articulación flexible.....	14
Figura 1.2: Ejemplos de aplicaciones de los actuadores VSA.....	17
Figura 1.3: Diseño mecánico de los actuadores: (a) AVASTT y (b) MMJS.....	18
Figura 2.1: Prototipo CAD del Actuador de Rigidez Variable AVASTT.....	21
Figura 2.2: Prototipo CAD del Actuador de Rigidez Variable MMJS.....	22
Figura 2.3: Clasificación de los actuadores flexibles.....	22
Figura 2.4: Control de fuerza a través de un actuador elástico en serie.....	23
Figura 2.5: Actuador Elástico Serie (SEA): (a) Esquema mecánico y (b) Esquema de control.....	24
Figura 2.6: Ejemplo de aplicaciones SEA: (a) Dispositivo SEA lineal, (b) Dispositivo SEA para un manipulador seguro.....	25
Figura 2.7: (a) Pierna robótica con SEA 2010 y (b) Dispositivo SEA para una rodilla asistente..	26
Figura 2.8: Configuración Antagónica: (a) Simple, (b) Cruzada y (c) Bidireccional.....	26
Figura 2.9: VSA diseñado por Migliore.....	27
Figura 2.10: Múltiples métodos de variar la rigidez.....	28
Figura 2.11: VSA diseñado por Tonietti.....	29
Figura 2.12: VSA-II.....	30
Figura 2.13: Actuador mecánicamente ajustable AMASC.....	31
Figura 2.14: Dispositivo músculo neumático plegado (PDMA): (a) Esquema mecánico y (b) Comportamiento de músculo neumático.....	32
Figura 2.15: Diseño DM2 de la Universidad de Stamford.....	33
Figura 2.16: Dispositivo con estructura laminar.....	34
Figura 2.17: Cambio por longitud: (a) Dispositivo básico de lámina, (b) Dispositivo de 4 láminas.....	35
Figura 2.18: Mecanismo rotacional: (a) Configuración de mínima rigidez y (b) Configuración de máxima rigidez.....	35
Figura 2.19: Resorte Jack.....	36
Figura 2.20: Fluidos magnetoreológicos: (a) Embrague MR y (b) Robot plano con embragues MR.....	37
Figura 2.21: Sistema de la Universidad Vrije.....	37
Figura 2.22: MACCEPA: vista superior del MACCEPA 1.0 y vista superior del MACCEPA 2.0.....	38
Figura 2.23: Rigidez articular variable (VS-Joint).....	39
Figura 2.24: Dispositivo AwAW.....	40
Figura 2.25: Modelo CAD (izquierda) y prototipo del AwAW (derecha).....	41
Figura 2.26: Otros dispositivos por control de par: (a) El dispositivo de Reza y (b) HDAU.....	41
Figura 2.27: Elementos que actúan dependiendo del tipo de flexibilidad articular: (a) Rigidez variable por variación del punto de equilibrio mediante motor, (b) Rigidez variable por variación del punto de equilibrio mediante resorte no lineal y (c) Rigidez variable por configuración antagónica.....	42
Figura 2.28: Elementos internos de Harmonic-Drive.....	42
Figura 2.29: Esquema de adquisición de medidas de un sistema físico a través de la instrumentación.....	43
Figura 2.30: Sensor para la medida de posición (encoder): (a) Esquema de funcionamiento y (b) Partes que conforman el encoder.....	45
Figura 2.31: Principios de funcionamiento del encoder incremental: (a) Disco codificador y (b) Señales de salida.....	45

Figura 2.32: Ejemplos de encoder magnético: (a) Cabezal lector y (b) Cabezal junto con cinta detectora.	46
Figura 2.33: Construcción básica de una galga extensiométrica.....	47
Figura 2.34: Sensor de fuerza/par: (a) y (b) Esquemas de medida multieje.	47
Figura 2.35: Acelerómetro piezoeléctrico: (a) Diagrama de un acelerómetro piezoeléctrico, (b) Construcción interna y (c) Medida en diferentes ejes de un acelerómetro triaxial.....	48
Figura 2.36: Composición mecánica del motor.....	49
Figura 2.37: Funcionamiento del núcleo del motor.	50
Figura 2.38: Esquema de generación de fuerza en el motor.	51
Figura 2.39: Reductor planetario.	51
Figura 2.40: Sensor de posición intrínseco.....	52
Figura 2.41: Esquema completo de todos los elementos que componen el motor principal y secundario.	52
Figura 2.42: Esquema de circuito de control.....	53
Figura 2.43: Esquema de control por encoder.	53
Figura 2.44: Esquema de control de corriente.	54
Figura 2.45: Controlador EPOS, así como conexión con diferentes dispositivos.....	54
Figura 3.1: Estructura general del banco de ensayos: (Zona 1) Actuador, (Zona 2) Mesa de ensayo y dummy, (Zona 3) Mesa de instrumentación y (Zona 4) Estaciones de control.	56
Figura 3.2: Instrumentación utilizada para los ensayos de impacto.	57
Figura 3.3: Controladores electrónicos y sistema de adquisición de datos.	57
Figura 3.4: Esquema general de funcionamiento del banco de ensayos.....	58
Figura 3.5: Dummy traslacional de 1GDL: (a) Diagrama de cuerpo libre y (b) Modelo CAD.	59
Figura 3.6: Dummy real en la mesa de impactos.....	60
Figura 3.7: Diseño conceptual del actuador de rigidez variable. En posición de equilibrio (arriba) y en posición desviada bajo una carga exterior (abajo).....	61
Figura 3.8: Esquema de funcionamiento del actuador de rigidez variable.....	61
Figura 3.9: Modelos CAD de AVASTT: (a) Modelo del actuador completo, (b) Disposición de los distintos elementos del actuador y (c) Modelo explosionado del actuador.....	63
Figura 3.10: (a) Mecanismo de doble corredera y (b) Fuerzas en el pin.....	64
Figura 3.11: Mecanismo con flexibilidad: (a) Estado inicial de equilibrio y (b) configuración general.	65
Figura 3.12: Mecanismo de doble muelle: (a) equilibrio inicial (b) estado de flexibilidad por una primera fuerza (c) estado de flexibilidad por una segunda fuerza.....	65
Figura 3.13: Prototipo CAD de MMJS.....	66
Figura 3.14: (a) Posición inicial, (b) Aplicación de una pequeña fuerza externa que produce la compresión de los resortes superiores y una $\theta < \beta_{th}$, y (c) Aplicación de una fuerza grande que produce que los resortes superiores e inferiores del actuador sean comprimidos como se muestra en el interior del contorno de puntos ($\theta = \beta_{m\acute{a}x}$).	66
Figura 3.15: Encoder acoplado a los motores.....	67
Figura 3.16: Acelerómetro 200B04.	68
Figura 3.17: Acelerómetro J352C03.	69
Figura 3.18: Acelerómetro 356A15.....	69
Figura 3.19: Encoder magnético (sensor y rueda).	70
Figura 3.20: Electrónica de sensor fuerza/par.	70
Figura 3.21: (a) Terminaciones de cable R-J11 y R-J45, (b) Sensor fuerza/par JR3 y (c) Tarjeta procesadora de señal.	71

Figura 3.22: (a) Parte frontal del acondicionador 482C05, (b) Conexiones traseras del acondicionador 482C05y (c) Placa electrónica interna del acondicionador 482C05.	72
Figura 3.23: Jumpers seleccionables de la placa electrónica del acondicionador 482C05.	72
Figura 3.24: Esquema de funcionamiento de la tarjeta procesadora de señal PCI JR3.	73
Figura 3.25: Esquema general de acondicionamiento del sensor fuerza/par ATI.	74
Figura 3.26: Esquema general de uso del DAQ.	74
Figura 3.27: Hardware DAQ y pines de conexión.	75
Figura 3.28: Motor principal.	77
Figura 3.29: Motor secundario.	77
Figura 3.30: Disposición de los motores principal y secundario en AVASTT.	78
Figura 3.31: Controlador electrónico de posición EPOS2.	78
Figura 3.32: Esquema de la red de EPOS2 creada a través CANopen y USB.	79
Figura 3.33: EPOS2 en el banco de ensayos: 50/5 (izquierda) y 70/10 (derecha).	81
Figura 3.34: Esquema del controlador a bajo nivel.	82
Figura 3.35: Esquema general de control para todo el banco de ensayos.	85
Figura 4.1: Diagrama conceptual de funcionamiento.	89
Figura 4.2: Menú principal del HMI para el control del banco de ensayos.	90
Figura 4.3: Panel frontal de las comunicaciones.	91
Figura 4.4: Diagrama de bloques asociado a las comunicaciones.	92
Figura 4.5: Panel frontal de la configuración de controladores.	93
Figura 4.6: Ejemplo de configuración de controlador del motor	93
Figura 4.7: Ejemplo de configuración de controlador del motor	94
Figura 4.8: Diagrama de bloques en la selección.	96
Figura 4.9: Panel frontal del controlador principal (rojo) y secundario (azul), donde se pueden observar los PID para posición, velocidad y corriente.	97
Figura 4.10: Diagrama de bloques asociado a los PID de control en posición, velocidad y corriente.	97
Figura 4.11: Diagrama de control en lazo cerrado con feed-forward.	98
Figura 4.12: Panel frontal de la configuración de controladores, donde se observan los parámetros feed-forward a introducir por el operador.	99
Figura 4.13: Diagrama de bloques asociado a la introducción de parámetros feed-forward.	99
Figura 4.14: Pantallas frontales para la configuración de sensores: (a) Configuración de acelerómetros, (b) Configuración de encoders, (c) Configuración de fuerza/par y (d) Configuración de sensores intrínsecos.	102
Figura 4.15: Pantalla frontal mostrada al operador para la elección del modo de carga desde archivo para la configuración de los EPOS2.	105
Figura 4.16: Diagrama de bloques para la carga desde archivo individual.	106
Figura 4.17: Diagrama de bloques para la carga desde archivo conjunta.	106
Figura 4.18: Diagrama de bloques para la carga manual.	107
Figura 4.19: Ejemplo de un VI DAQmx que permite a los usuarios configurar un registro de datos a un archivo TDMS incluso antes de iniciar la tarea.	108
Figura 4.20: Ejemplo de programación para la lectura de una entrada analógica en el DAQ.	108
Figura 4.21: Ejemplo de DAQmx Read para diferentes instancias: data1) DBL, data2) Waveform, data3) Boolean y data4) Unsigned.	109
Figura 4.22: Ejemplo de frecuencia de muestreo: 1) Señal salida que se corresponde con la señal de entrada mediante una correcta selección muestras/s, y 2) Señal salida que no se corresponde con la señal de entrada mediante una incorrecta selección muestras/s.	110

Figura 4.23: Ejemplo de completo programación de DAQ para lectura, utilizando timing y buffer.	110
Figura 4.24: Esquema conceptual de la programación de DAQ para lectura.....	111
Figura 4.25: Panel frontal para la ejecución en modo PPM.	112
Figura 4.26: Diagrama de bloques del modo PPM.	114
Figura 4.27: Diagrama de bloques interno del subVI PPM.	114
Figura 4.28: Panel frontal para la ejecución en modo HM.	115
Figura 4.29: Diagrama de bloques del modo HM.	116
Figura 4.30: Diagrama de bloques interno del subVI Find Home.	117
Figura 4.31: Ejemplo de trayectoria interpolada a través de puntos intermedios.	117
Figura 4.32: Panel frontal para la ejecución en modo IPM.....	118
Figura 4.33: Diagrama de bloques del modo IPM.	119
Figura 4.34: Panel frontal para la ejecución en modo PM.....	120
Figura 4.35: Diagrama de bloques del modo PM.....	122
Figura 4.36: Panel frontal para la ejecución en modo PVM.	123
Figura 4.37: Diagrama de bloques del modo PVM.	124
Figura 4.38: Diagrama de bloques interno del subVI PVM.	125
Figura 4.39: Panel frontal para la ejecución en modo CM.....	125
Figura 4.40: Diagrama de bloques del modo CM.	127
Figura 4.41: Diagrama de bloques interno del subVI Triángulo Corriente.	127
Figura 4.42: Panel frontal para la ejecución en modo PPM en el motor 2 (secundario).	128
Figura 4.43: Diagrama de bloques del modo PPM en el motor 2 (secundario).	129
Figura 4.44: Panel frontal para la ejecución en modo HM en el motor 2 (secundario).	129
Figura 4.45: Diagrama de bloques del modo HM en el motor 2 (secundario).....	129
Figura 4.46: Panel frontal para la ejecución en modo IPM en el motor 2 (secundario).	130
Figura 4.47: Diagrama de bloques del modo IPM en el motor 2 (secundario).	130
Figura 4.48: Panel frontal para la ejecución en modo PM en el motor 2 (secundario).	131
Figura 4.49: Diagrama de bloques del modo PM en el motor 2 (secundario).	131
Figura 4.50: Diagrama de bloques para la monitorización de los acelerómetros.	132
Figura 4.51: Diagrama de bloques para la lectura de los acelerómetros.....	132
Figura 4.52: Diagrama de bloques para la monitorización de los encoders.....	133
Figura 4.53: Diagrama de bloques para la lectura de los encoders.....	133
Figura 4.54: Panel frontal del menú principal.....	134
Figura 4.55: Panel frontal para la monitorización directa de los sensores extrínsecos.	135
Figura 4.56: Diagrama de bloques para la monitorización de sensores intrínsecos en el caso del modo de operación HM.....	136
Figura 4.57: Diagrama de bloques del sensor fuerza/par JR3, donde se muestran los bloques con “mosca azul” que indican que son variables compartidas en red.	137
Figura 4.58: Diagrama de bloques del sensor fuerza/par JR3 en la estación esclava.	137
Figura 4.59: Parte del diagrama de bloques en detalle del sensor fuerza/par JR3 en la estación esclava.....	138
Figura 4.60: Panel frontal del sensor fuerza/par JR3 en la estación esclava.....	138
Figura 4.61: Código de colores de estado asociado a la interfaz del sensor JR3 en la estación esclava: Parado (rojo), ámbar (Conectado y a la espera de una orden del PC Maestro) y verde (leyendo).....	139
Figura 4.62: Código de colores de estado asociado a la interfaz del sensor JR3 en la estación esclava: Parado (rojo), ámbar (Conectado y a la espera de una orden del PC Maestro) y verde (leyendo).....	140

Figura 4.63: Ejemplo de visualización de error detectado.	140
Figura 4.64: Panel frontal del menú principal donde se puede observar el botón para la limpieza de errores.	141
Figura 4.65: Aviso mostrado al operador para confirmar la limpieza de errores.	141
Figura 4.66: Diagrama de bloques para la limpieza de errores.	142
Figura 4.67: Icono del software-interfaz para inicializar el sensor JR3, previo a LabVIEW.	142
Figura 4.68: Identificación de Device ID en la tarjeta PCI.	143
Figura 4.69: Introducción de Device ID en software-interfaz jr3pci.	143
Figura 4.70: Download DSP CODE en software-interfaz jr3pci.	144
Figura 4.71: Read Sensor INFO en software-interfaz jr3pci.	144
Figura 4.72: Parámetros en software-interfaz jr3pci.	146
Figura 4.73: Lecturas del sensor en software-interfaz jr3pci.	146
Figura 5.1: Lecturas del ensayo de control de posición PPM.	149
Figura 5.2: Lecturas del ensayo de control de posición PM-DC.	150
Figura 5.3: Lecturas del ensayo de control de posición PM-AC.	151
Figura 5.4: Lecturas del ensayo de control de posición IPM.	152
Figura 5.5: Método HM - Current Thresold Positive Speed & Index.	153
Figura 5.6: Lecturas del ensayo de control de posición HM.	154
Figura 5.7: Lecturas del ensayo de control de posición CM-A.	155
Figura 5.8: Lecturas del ensayo de control de posición CM-L.	156
Figura 5.9: Lecturas del ensayo de control de posición CM-C.	157
Figura 5.10: Lecturas del ensayo de control de posición PVM-DC.	158
Figura 5.11: Lecturas del ensayo de control de posición PVM-AC.	159
Figura 5.12: Lecturas del ensayo de monitorización de instrumentos.	160
Figura 5.13: Lecturas del ensayo de monitorización en la estación esclava.	161
Figura 5.14: Montaje experimental del actuador MMJS.	162
Figura 5.15: El consumo de energía de MMJS para diferentes frecuencias.	163
Figura 5.16: Prueba estática: (a) Fuerza de contacto en función del tiempo con y sin el MMJS y (b) Fuerza de contacto frente a deflexión de MMJS.	164
Figura 5.17: Prueba estática en MMJS: (a) Muelles de precarga en zona de par $< \tau t_1$, (b) Muelles de precarga en zona $\tau t_1 < \text{par} < \tau t_2$, y (c) Muelles de precarga en zona de par $> \tau t_2$	164
Figura 5.18: Prueba dinámica: (a) con y sin el MMJS, (b) estrategia de reacción.	165
Figura 8.1: Un bucle While se representa por un lazo gráfico que se ejecuta hasta que se cumple una condición de parada.	175
Figura 8.2: La ejecución Highlight provee de una forma intuitiva de entender el orden de ejecución del código.	175
Figura 8.3: La barra de herramientas ofrece acceso a las herramientas de depuración estándar como la ejecución paso a paso.	176
Figura 8.4: Las sondas son formas eficientes de ver los valores moviéndose por los cables de la aplicación, incluso para secciones paralelas del código.	176
Figura 8.5: La flecha rota de ejecución provee de información inmediata de errores en el código.	176
Figura 8.6: Lista de errores detectados en el código, así como posibles causas y soluciones. .	177
Figura 8.7: El patrón de diseño Productor/Consumidor de LabVIEW es a menudo usado para aumentar el rendimiento de las aplicaciones que requieren tareas paralelas.	178
Figura 8.8: Solución mediante código en LabVIEW.	179
Figura 8.9: Solución mediante código en C++.	179

Figura 8.10: Ejemplo de software para reconocimiento de tarjeta PCI.....	180
Figura 8.11: Ejemplo de reconocimiento desconocido de tarjeta PCI.....	180
Figura 8.12: Ejemplo de selección de ruta para instalación de tarjeta PCI.....	181
Figura 8.13: Ejemplo de instalación completada de tarjeta PCI.....	181
Figura 8.14: Ejemplo de instalación de software-interfaz para comprobación de tarjeta PCI.	182
Figura 8.15: Ejemplo de ejecución de la aplicación “Símbolo del sistema”.	183
Figura 8.16: Ejemplo de ubicación de la carpeta jr3pci_soft_2005 mediante “Símbolo del sistema”.....	183
Figura 8.17: Ejemplo de registro del controlador ActiveX desde la aplicación “Símbolo del sistema”.....	183

Índice de Tablas

Tabla I: Parámetros característicos del dummy de 1 G.D.L.	60
Tabla II: Parámetros característicos de los encoders intrínsecos.	68
Tabla III: Parámetros característicos del acelerómetro 200B04.	68
Tabla IV: Parámetros característicos del acelerómetro J352C03.	69
Tabla V: Parámetros característicos del acelerómetro 356A15.	69
Tabla VI: Parámetros característicos del sensor.	70
Tabla VII: Parámetros característicos de la rueda.	70
Tabla VIII: Parámetros característicos del sensor fuerza/par.	70
Tabla IX: Fondos de escala del sensor fuerza/par.	71
Tabla X: Características del motor principal.	77
Tabla XI: Características del motor secundario.	77
Tabla XII: Características EPOS2 70/10.	79
Tabla XIII: Características EPOS2 50/5.	80
Tabla XIV: Parámetros del esquema del controlador a bajo nivel.	82
Tabla XV: Parámetros y descripción a configurar en la pantalla de comunicaciones.	91
Tabla XVI: Modos de operación seleccionables por el operador.	94
Tabla XVII: Parámetros para la configuración de acelerómetros.	102
Tabla XVIII: Parámetros para la configuración de encoders.	102
Tabla XIX: Parámetros para la configuración de fuerza/par.	104
Tabla XX: Parámetros para la configuración de los sensores intrínsecos.	104
Tabla XXI: Parámetros de waveform al usar DAQmx Read.	109
Tabla XXII: Parámetros de muestras al usar DAQmx Read.	109
Tabla XXIII: Parámetros de configuración del modo PPM.	113
Tabla XXIV: Parámetros de configuración del modo HM.	115
Tabla XXV: Parámetros de configuración de la nube de puntos de IPM.	118
Tabla XXVI: Parámetros de configuración del modo PM.	121
Tabla XXVII: Parámetros de configuración del modo PVM.	123
Tabla XXVIII: Parámetros de configuración del modo CM.	126
Tabla XXIX: Presupuesto.	169

1 PLANTEAMIENTO

1.1 Introducción

Desde hace unos años, se ha incrementado notablemente el interés en aplicaciones donde los robots comparten el entorno de trabajo con el hombre. Hasta ahora, en el campo industrial, la seguridad humano-robot está controlada por un entorno limitado basado en la separación de ambas zonas de trabajo (Echávarri Otero, et al., 2007). Por ello, gran parte de los esfuerzos de desarrollo tecnológico en automática y robótica, se han centrado en la manipulación rápida y precisa a través de materiales inflexibles y pesados con el objeto de dotar de rigidez estructural al mecanismo robótico, pero que implican altos valores de inercia en los movimientos. Ello deriva en serios problemas para gestionar imprevistos, como la aparición de un objeto nuevo en escena o la modificación del entorno.

Sin embargo, en el ámbito de la robótica de servicio, la interacción física entre los propios robots, seres humanos y medio ambiente en general, ya no es una situación poco frecuente que deba evitarse, sino una condición de funcionamiento. En consecuencia, los enfoques tecnológicos que se ocupan de estas situaciones, son esenciales para garantizar la seguridad, permitiendo salvaguardar la integridad física de los individuos.

En este nuevo entorno de contacto entre hombre y máquina, se han planteado como una solución, los denominados robots con articulaciones flexibles (RAF). Éstos se basan en el concepto de actuador ajustable a solicitudes de fuerza o par externas, a través de un movimiento de adaptación suave, planteando la flexibilidad como una propiedad mecánica ventajosa. Un ejemplo sencillo que permite visualizar esta idea, consiste en añadir al extremo de un robot una muñeca flexible, y luego acoplar a ésta, un útil de trabajo. Si aplicáramos unas fuerzas sobre el brazo del robot, éstas generarían una oscilación que la muñeca absorbería a través de una deformación, facilitando, por ejemplo, que un pasador se introduzca en un agujero a pesar de los pequeños errores que puedan producirse en la posición del robot (Figura 1.1).

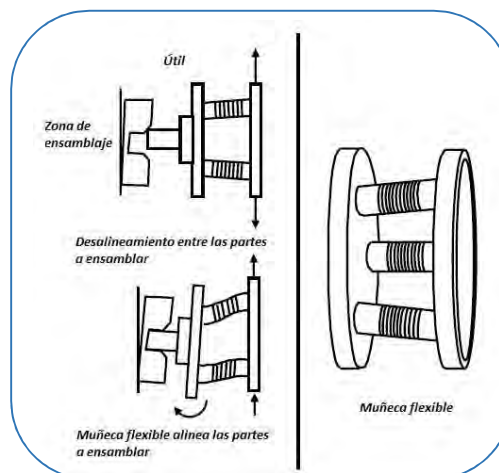


Figura 1.1: Ejemplo de articulación flexible.



Con esta idea ya presentada y, encuadrado dentro de estos RAF, se encuentran los actuadores de rigidez variable; también conocidos como VSA (por sus siglas en inglés: *Variable Stiffness Actuator*).

El VSA desarrolla la idea de desacoplar elásticamente la inercia del rotor de la inercia del eslabón, de manera que la inercia del primero no contribuya a aumentar la fuerza generada en un impacto accidental (Giménez Fernández, et al., 2012).

Precisamente, controlar el robot en situaciones de colisión, se ha convertido en una línea emergente de investigación en dispositivos robóticos que actúan coordinadamente entre sí o con seres humanos. Más en concreto, el problema típico a estudiar, es aquel en el que se presentan situaciones con movimientos inesperados y donde es necesario garantizar la seguridad física del ser humano. Para ello, las soluciones que plantean los VSA suponen una revolución dentro de los RAF, ya que plantean ideas que combinan la reducción de los parámetros inerciales que permitan limitar las fuerzas en el impacto del robot y la adición de componentes flexibles en su estructura. Con ello, si el impacto finalmente se produjera, los daños se reducen drásticamente comparados con los de un robot tradicional rígido, debido a:

- Son robots más ligeros, lo que implica menor energía cinética en el instante del impacto.
- En la colisión con un objeto, su energía cinética se transforma principalmente en energía potencial elástica del actuador, minimizando los daños del choque.
- En el impacto de un robot rígido, la fuerza de reacción en su extremo aumenta abruptamente en microsegundos. Para el caso de un robot con rigidez variable, dicha fuerza de reacción crece más lentamente, alcanzando valores pico menores, en un espacio de tiempo del orden de milisegundos; lo cual, permite el cambio de estrategia principal centrado en el control de posición, a otra de control de fuerza que anule el efecto nocivo del impacto.

De esta manera, se podría contar con una alta rigidez durante una operación sin peligro de colisión o al inicio de la deformación, y baja en el caso de sobrecargas o de impacto (López Martínez, et al., 2014).

Asimismo, el incremento en el desarrollo de estos nuevos actuadores, ha venido potenciado por sus ventajas en otros campos en auge, como la robótica de rehabilitación o las prótesis. Además de reducir las elevadas fuerzas originadas en la articulación, otra gran ventaja de los VSA es su capacidad de almacenar y devolver energía gracias a sus elementos elásticos pasivos. Así, el uso de estos actuadores se está extendiendo en aplicaciones donde la eficiencia energética puede ser incrementada, modificando la frecuencia natural del actuador. Un ejemplo del desarrollo en este ámbito, se puede observar en robots caminantes, donde la rigidez de la articulación se puede ajustar según la velocidad del paso, permitiendo un movimiento más natural y más eficiente en términos energéticos.

Aunque los avances que se han alcanzado son considerables, es necesario seguir profundizando en el estudio del comportamiento de los sistemas que incorporan elementos flexibles y de rigidez variable, así como las técnicas que permiten controlarlos. Sólo de esta manera, los VSA podrán utilizarse en aplicaciones reservadas hasta ahora a sistemas rígidos, eliminando sus inconvenientes y logrando una interacción humano-robot completamente armónica con altos estándares de seguridad. Es por ello, que este trabajo de fin de grado está enfocado en el desarrollo de la automatización de un banco de ensayos que arroje nuevos datos acerca del comportamiento de este tipo de dispositivos en escenarios reales.

1.2 Motivaciones y origen del proyecto

Actualmente, en la vida cotidiana, es más que conocido que la presencia de los robots crece y se amplía. Específicamente y cada vez con más frecuencia, se utilizan para determinadas funciones relacionadas con la asistencia sanitaria y el cuidado de discapacitados.

Es por ello que una de las áreas más interesantes de la robótica, es la interacción humano-robot. Existe un acuerdo general entre los expertos y el público, por el que los robots deben moverse, sentir, manipular su entorno y mostrar un comportamiento inteligente, especialmente si ese comportamiento involucra a los humanos, para poder establecer una completa confianza. Así, criterios como la “seguridad física” o “sensación de seguridad”, son los que llevan a analizar de manera conceptual parámetros intrínsecos de diseño, que de manera directa o indirecta deben ser considerados.

Estos dispositivos robóticos, que mezclan la electrónica y la mecánica, pueden ser combinados con el conocimiento de la anatomía humana, generando un alto impacto en la calidad de vida de personas que son amputadas, que han sufrido un accidente cerebro vascular o discapacitadas permanentemente. Estos dispositivos de rigidez variable, puede ser incorporados en exoesqueletos, prótesis activas de rodillas, brazos mecánicos, o en robots que pueden ser aliados del día a día (Figura 1.2).

Con estas motivaciones, y centrando el campo de estudio en los VSA, se pretende potenciar la salida de los robots del entorno industrial, aumentando así de manera vertiginosa las aplicaciones en las que se utilizan robots para hacer la vida más fácil al ser humano y que constituyen tan solo el inicio de la inmensa cantidad de soluciones que puede tener cabida en un futuro próximo.

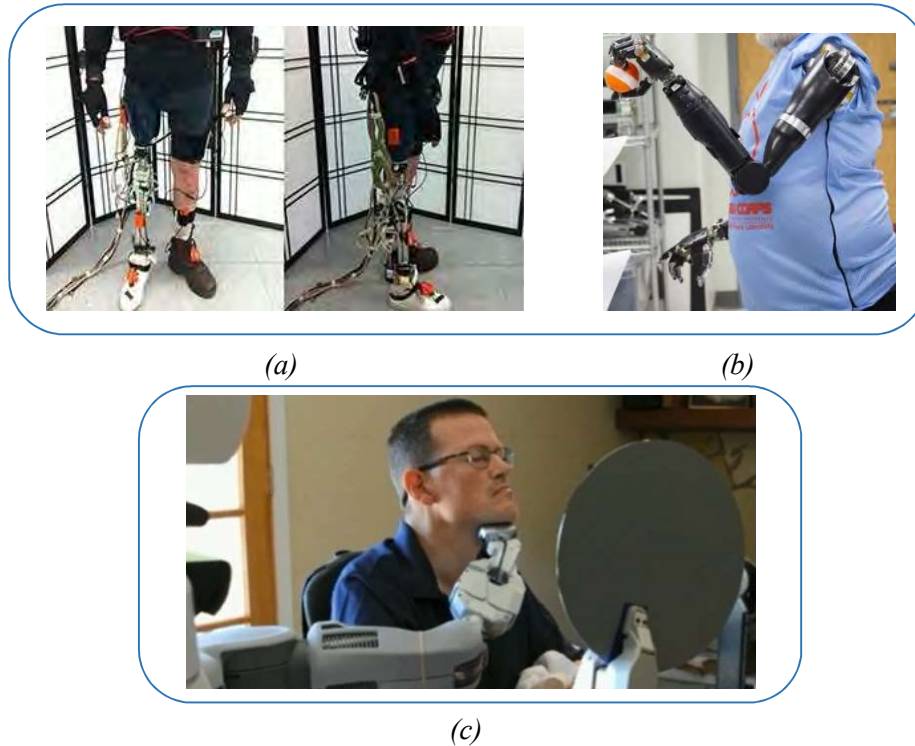


Figura 1.2: Ejemplos de aplicaciones de los actuadores VSA: (a) Prótesis flexible de rodilla, (b) Prótesis de brazo robótico con codo de rigidez variable y (c) Robot asistencial con control de fuerza.

Basándose en ésta necesidad de seguir consolidando la seguridad de los dispositivos robóticos, la Universidad de Almería (UAL) desarrolló el prototipo actuador de rigidez variable sin pre-tensión AVASTT (*Actuator with Variable Stiffness and Torque Threshold*), cuyo mecanismo basado en transmisión por cables lo caracteriza y diferencia de otros (Figura 1.3 (a)). Éste es un dispositivo serie sin pre-tensión, que consiste en un actuador tradicional con un mecanismo de transmisión flexible que permite el ajuste de al menos uno de los parámetros que define su rigidez (módulo de Young, momento de inercia o longitud eficaz del resorte) (Choi et al., 2009; Ahmed & Kalaykov, 2010), o un cambio mecánico en la forma de transmisión del par (cambio de la ubicación del resorte, del punto de aplicación del par, de la posición del eje de rotación o del ángulo con que se transmite la fuerza) (Jafari et al., 2011; Groothuis et al., 2012).

Por otra parte, la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) proyectó y construyó el dispositivo con pre-tensión MMJS (*Mechanism of Multiple Joint Stiffness*) cuyo diseño basado en el cambio de rigidez pasivo mediante muelles pre-comprimidos constituyen una alternativa a AVASST (Figura 1.3 (b)). Está basado en la incorporación de un elemento flexible en el mecanismo de transmisión, que puede ser comprimido de manera independiente por un segundo actuador. Al tener una característica fuerza-elongación no lineal, la compresión aplicada sobre el resorte traslada el punto de operación del mismo a diferentes valores de rigidez (Vanderborgh et al., 2011; Wolf & Hirzinger, 2008; Wolf et al., 2011).

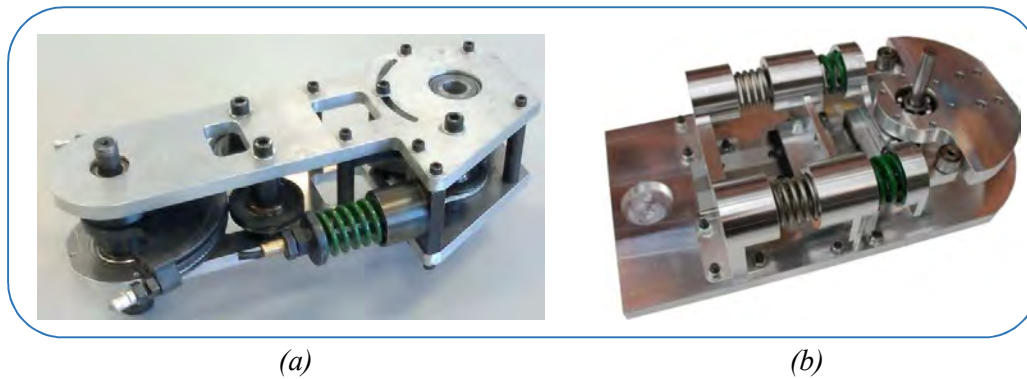


Figura 1.3: *Diseño mecánico de los actuadores: (a) AVASTT y (b) MMJS.*

Basados en estos conceptos rígido-flexibles, ambos prototipos estaban listos para el siguiente paso; ser testeados, para poder realizar una comparación sólida con los estudios teóricos previos. Con este objetivo, el grupo VSA de la UC3M fabricó una bancada de ensayos en su laboratorio de robótica.

Gracias a este nuevo equipamiento, AVASTT y MMJS serán evaluados en diferentes situaciones y configuraciones, que arrojarán nuevos datos acerca de sus comportamientos reales gracias al control de los mismos, contribuyendo a la comprensión y el desarrollo de este tipo de dispositivos.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es diseñar e implementar el sistema de control automático necesario para los ensayos en el banco de impactos, particularmente ideado para los dispositivos AVASTT y MMJS. Dicha bancada permitirá, a través del uso de diversos equipos de instrumentación y control electrónico, dirigir y gobernar las articulaciones flexibles con rigidez variable, que permitan desarrollar posteriores estudios centrados en la identificación del sistema y el análisis de los daños que pueden producirse cuando un eslabón del brazo robótico impacta sobre un ser humano de forma inesperada.

Para ello las metas específicas planteadas fueron:

- ❖ Implementación de una estación HMI (*Human Machine Interface*) para la interacción con todo el banco de ensayos.
- ❖ Puesta en marcha de la instrumentación electrónica.
- ❖ Desarrollo de un sistema de adquisición de datos procedentes de la instrumentación.



- ❖ Desarrollo de la estrategia de control para la actuación de sistemas articulares como AVASTT y MMJS.
- ❖ Implementación de las pruebas de control, en sus diferentes configuraciones, para el dispositivo AVASTT.
- ❖ Implementación de las pruebas de impacto, en sus diferentes configuraciones, para el dispositivo MMJS.
- ❖ Adquisición, registro y estudio de los datos.

1.4 Estructura de la memoria

En el Capítulo 2 se realiza una descripción del estado del arte actual de las articulaciones flexibles, realizando un primer acercamiento formal al lector y dándole a conocer los autores principales y avances que se han producido, estableciendo comparaciones con otros conocimientos paralelos. En el Capítulo 3 se expone el diseño del sistema, donde se profundiza y se revisan los componentes que integran y forman parte del banco de ensayos, mostrando una visión particular y general de funcionamiento; continuando, en el Capítulo 4, con la descripción del software desarrollado para la estación HMI en su conjunto, que rige el comportamiento del actuador en los diferentes ensayos propuestos. En el Capítulo 5 se realizan ensayos de control y de impacto, incluyendo los resultados obtenidos en las diferentes configuraciones de experimentación. Finalmente, en el Capítulo 6, se exponen las conclusiones obtenidas, así como las líneas de actuación a seguir en un futuro próximo para la continuación de desarrollos que puedan involucrar este tipo de soluciones.

2 ESTADO DEL ARTE DE LOS ACTUADORES CON FLEXIBILIDAD ARTICULAR

2.1 Introducción

Antes de cualquier profundización en la materia, el lector debe saber qué es un actuador. Por definición, un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica, en una fuerza destinada a la activación de un proceso, con la finalidad de generar un efecto sobre un procedimiento automatizado. Éste recibe la instrucción de un regulador o controlador y, en función a ella, genera la orden para activar un elemento final de control (RAE, 2015).

Dentro de éstos, existen varios tipos, como son los electrónicos, hidráulicos, neumáticos o eléctricos. Además pueden ser lineales (generando una fuerza en línea recta) o rotativos (generando una fuerza rotatoria).

Los actuadores se aplican en todos los campos de la tecnología. Debido a las múltiples exigencias, existe una gran variedad de diseños; pero en este trabajo, se destacarán los sistemas electro-mecánicos que, por regla general, disponen de una entrada eléctrica y una salida mecánica.

De esta manera, se pueden señalar dos tipos de actuadores:

- El actuador rígido, que es el dispositivo capaz de realizar un movimiento hasta una posición específica o seguir una trayectoria predefinida. Una vez alcanzada dicha posición, será capaz de mantenerla, soportando las posibles fuerzas externas que se ejerzan sobre el actuador (dentro de los límites técnicos del dispositivo).
- El actuador flexible, que se desviará de su posición propia de equilibrio cuando se le aplique una fuerza externa.

Dentro de éstos últimos, existe una variante; la variación de la flexibilidad tanto de forma activa como pasiva. Los actuadores pasivos son aquellos compuestos únicamente de elementos puramente mecánicos (muelles o amortiguadores) y suelen ofrecer respuestas más rápidas y fiables para casos de colisión dinámica que un sistema activo. Esto es debido a que un sistema activo está formado por sensores, y éstos requieren de un tiempo de respuesta. Sin embargo, en el caso de utilizar un resorte blando en la articulación de un brazo robótico, la tarea de definir el movimiento con precisión, aumenta de dificultad, debido al comportamiento elástico del resorte.

A pesar de que un resorte rígido puede proporcionar una alta precisión de posicionamiento en un brazo robot, su capacidad de absorción de impactos es mucho menor que un resorte blando, por lo que aumentan las probabilidades de que se produzcan lesiones en el ser humano en caso de colisión.

Aun teniendo en cuenta los inconvenientes mencionados, la variación de rigidez de forma activa se presenta como menos recomendable, puesto que el tiempo de retardo

de respuesta de los sensores puede llegar a producir el choque. Actualmente, el control de la rigidez de manera activa ha alcanzado una etapa madura de investigación. En cambio, la variación de la rigidez de forma pasiva sigue en desarrollo (V. Ham, et al., 2009).

Un ejemplo de aplicación de estos conceptos de flexibilidad y rigidez, lo podemos encontrar en el propio ser humano. Éste tiene la capacidad de contraer sus músculos para reaccionar con la rigidez adecuada a las perturbaciones y relajarlos casi instantáneamente posteriormente. Para que un sistema técnico pueda imitar esas capacidades, debe contar con varios niveles de rigidez y una oposición al movimiento alta o baja dependiendo de la situación. Los sistemas actuales no cumplen todos los requisitos al mismo tiempo y son claramente superados por el hombre. Es por ello, que conseguir que un actuador mecánico presente unos resultados similares a la actuación humana, se haya convertido en un reto actual.

Con este fin, se construyeron los dispositivos flexibles pasivos de rigidez variable AVASST y MMJS.

AVASST se caracteriza específicamente por desacoplar la fuerza del motor de la articulación robótica y, además, por su capacidad para cambiar la rigidez aparente de la articulación dinámicamente. Posee un especial mecanismo que permite variar la rigidez y adoptar también una configuración totalmente rígida, disponiendo además de un par umbral ajustable, el cual, evita que entre en funcionamiento el mecanismo hasta que no se haya sobrepasado un cierto valor ejercido sobre la articulación, siendo este valor ajustable a conveniencia (Figura 2.1).

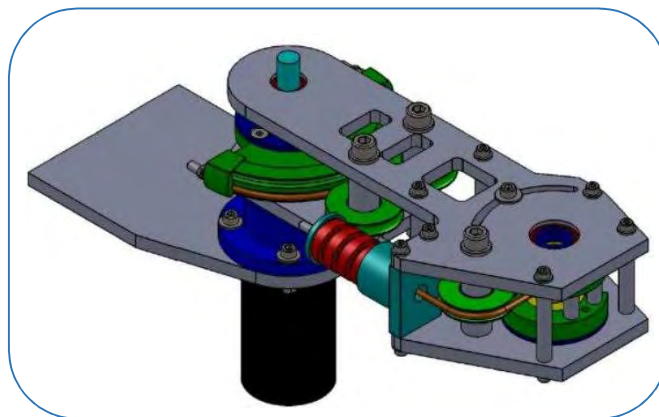


Figura 2.1: Prototipo CAD del Actuador de Rigidez Variable AVASST.

En cambio, el dispositivo MMJS se basa en una serie de muelles lineales, precargados y dispuestos de tal manera, que incluyan los beneficios de los actuadores elásticos serie y que limitan el par máximo aplicable. Éste es un mecanismo pasivo porque no tiene un segundo sistema de accionamiento en la misma articulación. Sin embargo, se trata de un sistema conjunto de rigidez variable, dada las tres fases de funcionamiento distintas que tiene, donde cada fase está definida por un valor de rigidez diferente, en función del par elástico que se produce en la articulación (Figura 2.2).

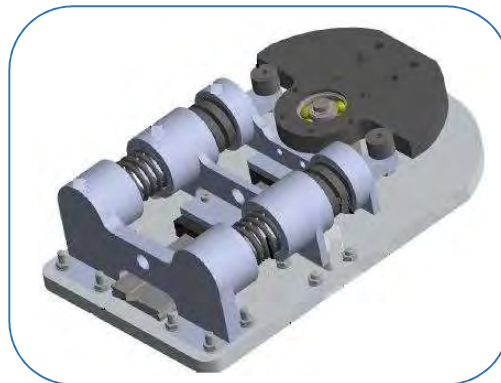


Figura 2.2: Prototipo CAD del Actuador de Rigidez Variable MMJS.

Para poder entender los conceptos teórico-técnicos sobre los que se basan estos actuadores, es necesario describir y profundizar en la situación actual de este campo. Una vez conocida dicha situación por el lector, se procederá al diseño e implementación de la estación para el control del banco de ensayos.

2.2 Actuadores con flexibilidad articular

2.2.1 Clasificación de los actuadores con flexibilidad articular

Como se ha introducido previamente, se puede realizar una primera clasificación, que nos permita hablar de actuadores flexibles activos y pasivos. Los actuadores pasivos se caracterizan por contener un elemento elástico en su estructura; en cambio, los actuadores activos, imitan el comportamiento de un resorte y la rigidez puede ser adaptada para que coincida con los requisitos de seguridad (Albu-Schäffer, et al., 2003).

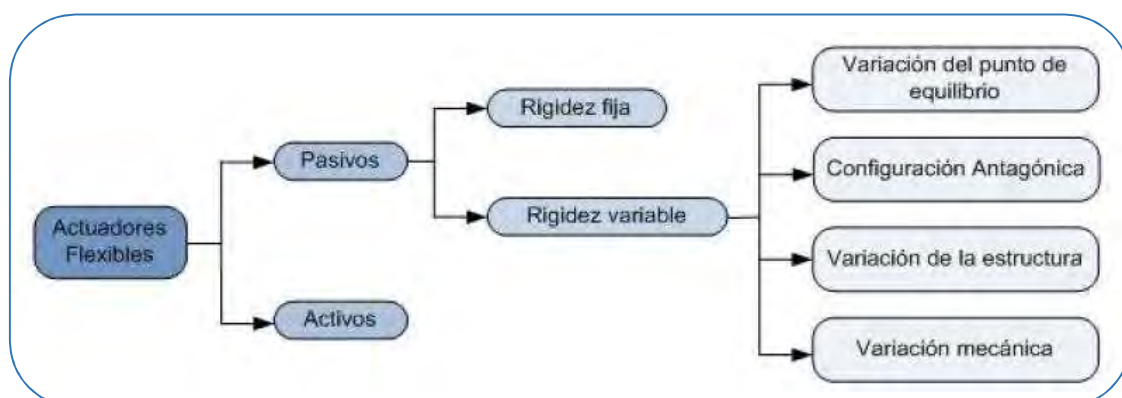


Figura 2.3: Clasificación de los actuadores flexibles.

Dentro de los actuadores flexibles pasivos, se puede hacer una distinción entre aquellos actuadores que no pueden variar su rigidez, y los que poseen algún mecanismo adicional que sí les permite modificarla (VSA). Éstos últimos, combinan el almacenamiento de energía (típico de los actuadores pasivos) con la variación de la rigidez (propio de los actuadores activos).

2.2.1.1 Actuador elástico serie

El actuador elástico serie, también denominados como SEA (*Series Elastic Actuators*) (A. Pratt & M. Williamson, 1995) está formado principalmente por un muelle colocado en serie con un actuador de rigidez. La rigidez viene determinada por la constante del resorte y consecuentemente, no es ajustable durante el funcionamiento. El estiramiento del resorte se utiliza como medida de fuerza y se alimenta de nuevo en el bucle de control.

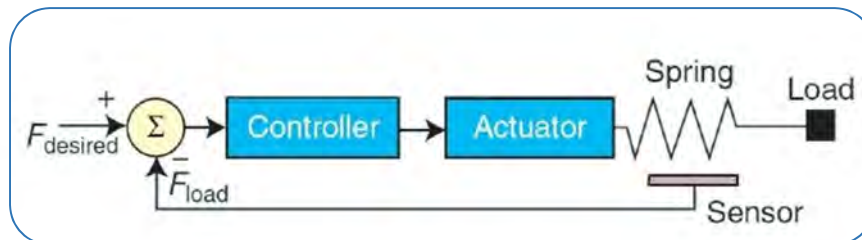


Figura 2.4: Control de fuerza a través de un actuador elástico en serie.

2.2.1.2 Actuadores flexibles con rigidez variable

En los últimos años, se han desarrollado una importante cantidad de actuadores de rigidez variable de forma pasiva. Estos actuadores se pueden clasificar en cuatro grupos principales (V. Ham, et al., 2009) (Figura 2.3):

- *Equilibrium Controlled Stiffness* (Variación del punto de equilibrio): estos actuadores flexibles utilizan resortes de rigidez constante en serie con un actuador convencional, como pueden ser, motores eléctricos o sistemas hidráulicos. Posteriormente, miden el desplazamiento del resorte, estimando así la fuerza aplicada para ajustar el par suministrado por el motor. La "rigidez virtual" del actuador se modifica al ajustar dinámicamente la posición de equilibrio del resorte. Es decir, la posición de equilibrio del resorte es controlada para ejercer una fuerza deseada que se podría traducir en una modificación de la rigidez.
- *Antagonistic Controlled Stiffness* (Configuración Antagónica): dos actuadores con rigidez constante y una característica fuerza-elongación no lineal, se acoplan antagónicamente. Así, mediante el control de los actuadores, la posición de equilibrio y la rigidez de esta configuración se pueden modificar. Para tener la

capacidad de variar la rigidez, es imprescindible que la característica del resorte de los dos actuadores sea no lineal, mientras que la característica del resorte equivalente resultará ser lineal.

- *Structure Controlled Stiffness* (Variación de la estructura): cuando se utiliza un resorte como elemento elástico, la rigidez depende del módulo del material, el momento de inercia y la longitud eficaz. En este caso, es posible controlar la rigidez mediante el ajuste de uno de estos parámetros. Así, se modifica la estructura física del resorte para lograr variaciones de rigidez.
- *Mechanically Controlled Stiffness* (Variación mecánica): muy similar a la variación de la estructura, también ajusta la rigidez física eficaz del sistema. Sin embargo, en este caso, la variación se produce realizando un cambio en la pretensión o precarga del resorte. Estos actuadores requieren sólo un elemento flexible. El actuador completo se comporta como un resorte de torsión, donde las características del resorte y la posición pueden ser controladas de forma independiente durante la operación.

A continuación se desarrollará cada uno de ellos.

Variación del punto de equilibrio

Un esquema típico de este tipo de actuadores se ilustra en la figura 2.5, donde el actuador está formado característicamente por cuatro elementos: un actuador rígido (motor eléctrico o actuador neumático), una reductora, un elemento elástico con rigidez constante (resorte) y la carga o eslabón.

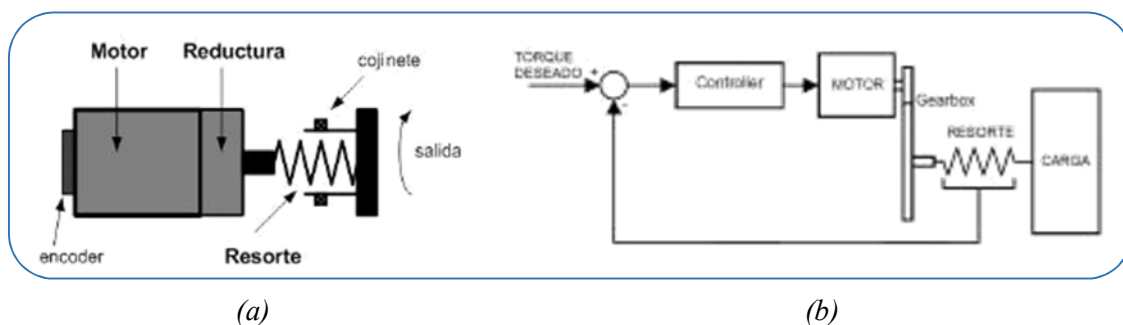


Figura 2.5: Actuador Elástico Serie (SEA): (a) Esquema mecánico y (b) Esquema de control.

Con la inclusión del elemento elástico, se desacopla la inercia del actuador de la inercia del eslabón y así, se reduce la impedancia de salida. El funcionamiento del mecanismo es similar al de un filtro paso bajo, por lo que a altas frecuencias (durante la primera etapa de un impacto) la elasticidad de la articulación desacopla el eslabón del actuador. El resultado radica en que la impedancia de salida depende fundamentalmente

de la inercia del eslabón. A bajas frecuencias (menores al ancho de banda del sistema a lazo cerrado) la impedancia de salida puede ser ajustada a través de las leyes de control.

Así pues, el problema asociado al control de la fuerza se convierte en un problema de control de posición. La posición del motor se ajusta en base a la medida de la compresión o elongación del resorte (Figura 3.2 (b)). De esta manera, se controla el par aplicado sobre el eslabón, al tiempo que se desacopla la inercia del motor. La rigidez del resorte no puede ser alterada directamente, en cambio, la rigidez equivalente del sistema sí puede ser modificada ajustando la posición de equilibrio del actuador. De esta manera, un esquema de control de posición logra el control de la rigidez.

La problemática resultante de controlar juntas elásticas pasivas ha sido muy tratado en la literatura, tanto en el caso general (Spong, 1987), (Luca & Lucibello, 1998), (Kelly, et al., 1994), (Luca & Lucibello, 1993) y (Konno & Uchiyama, 1995); como en el contexto del diseño orientado a la seguridad (Williamson, et al., 1995), (Okada, et al., 1999). Los actuadores SEA tienen innumerables aplicaciones en sistemas manipuladores pensados para la pHRI (*Physical Human Robot Interaction*), robots caminantes y prótesis robóticas.

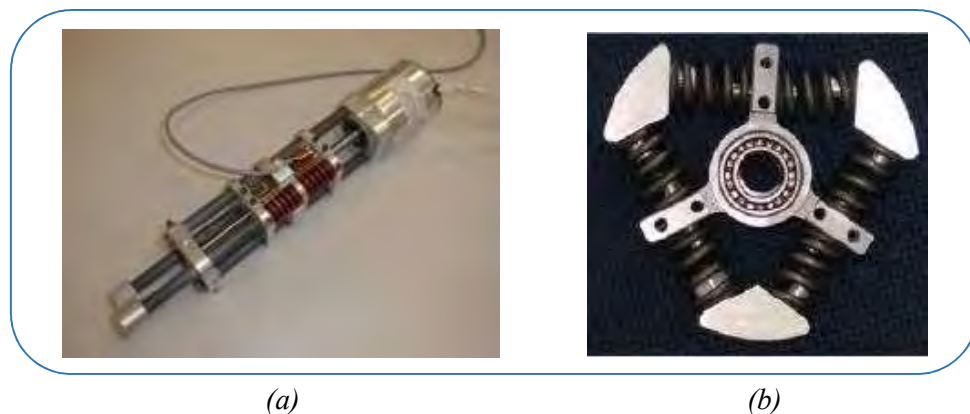


Figura 2.6: Ejemplo de aplicaciones SEA: (a) Dispositivo SEA lineal, (b) Dispositivo SEA para un manipulador seguro.

La figura 2.6 ilustra algunos ejemplos de aplicaciones que utilizan actuadores elásticos serie. El primero de ellos (Figura 2.6 (a)) muestra un actuador SEA lineal, para el desarrollo de robots caminantes, prótesis totales o complementarias. La segunda imagen, muestra un conjunto de resortes lineales que permiten desarrollar un SEA articular para un manipulador amigable (Tsagarakis, et al., 2009).

En la figura 2.7, se puede observar una tercera aplicación, centrada en una pierna completamente manejada por SEA's (Figura 2.7 (a)). Por último, la cuarta imagen (Figura 2.7 (b)) muestra un diagrama esquemático de un actuador SEA, en la cual se puede identificar fácilmente: (a) un actuador rígido, (b) un resorte de torsión, (c) el eslabón, (d) el encoder para la medida de la posición del rotor y (e) el encoder destinado a medir la posición del eslabón.

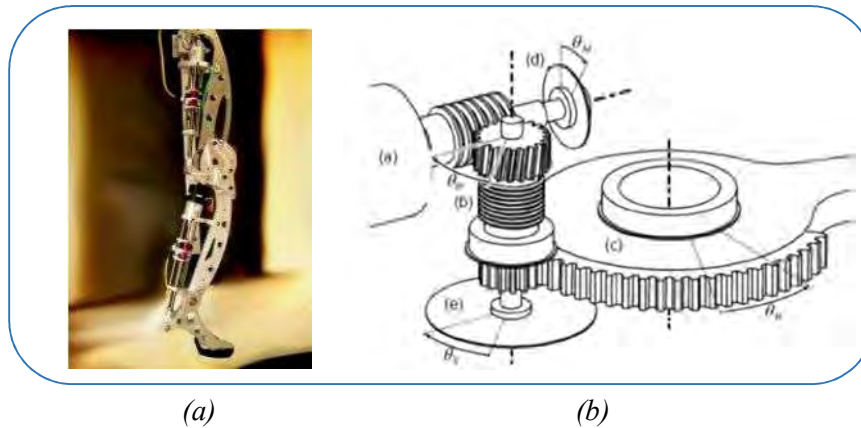


Figura 2.7: (a) Pierna robótica con SEA 2010 y (b) Dispositivo SEA para una rodilla asistente.

Configuración antagónica

La configuración antagónica está basada en una inspiración biológica, que es aplicada en una serie de actuadores mecánicos para conseguir cambios de rigidez. El ejemplo más destacado de un sistema antagónico, es la combinación de bíceps y tríceps en el brazo humano. Cuando el bíceps se contrae, se relaja el tríceps y el brazo es flexionado. De manera análoga, cuando el tríceps es contraído y se relaja el bíceps, el brazo se extiende.

Una de las razones por las que se necesita una configuración antagónica para poder movernos, es que los músculos sólo pueden tirar y no empujar. Además, cuando ambos (bíceps y tríceps) están contraídos, el codo se vuelve más rígido. En caso contrario cuando ambos se relajan, el codo se distiende y el brazo cuelga libremente.

Una configuración antagónica típica aplicada en la robótica, emplea dos actuadores flexibles, bien sea por que son de naturaleza flexible (como los músculos neumáticos) o por que se incorpora a ellos un elemento flexible (como es el caso de los SEA's). Sin embargo, este concepto puede ser implementado mediante tres arreglos diferentes, conocidos como: "Simple", "Cruzada" y "Bidireccional" (Figura 2.8).

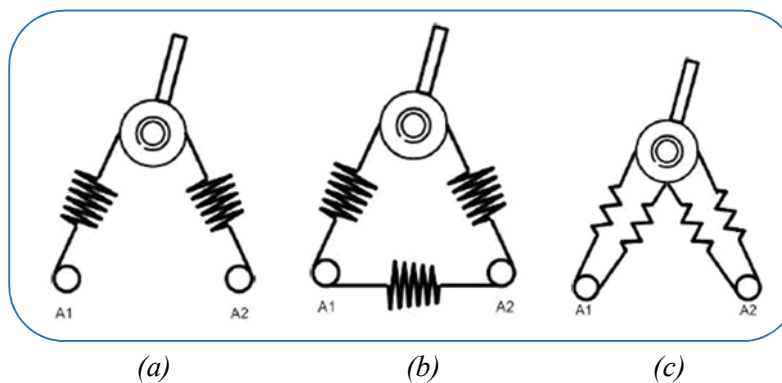


Figura 2.8: Configuración Antagónica: (a) Simple, (b) Cruzada y (c) Bidireccional.

Migliore (Migliore, et al., 2005) desarrolló un dispositivo basado en la configuración antagonista de dos resortes no lineales (Figura 2.9 (a), (b)). En la figura 2.9 (c), se puede observar cómo la característica lineal del resorte es transformada a una característica cuadrática, mediante el uso de piezas con formas especiales, sobre la cual dos ruedas giran. Los centros de las ruedas están conectados entre sí por un resorte lineal (los dispositivos antagonistas siempre requieren resortes no lineales o mecanismos que simulen un comportamiento elástico no lineal (Bicchi & Tonietti, 2004)).

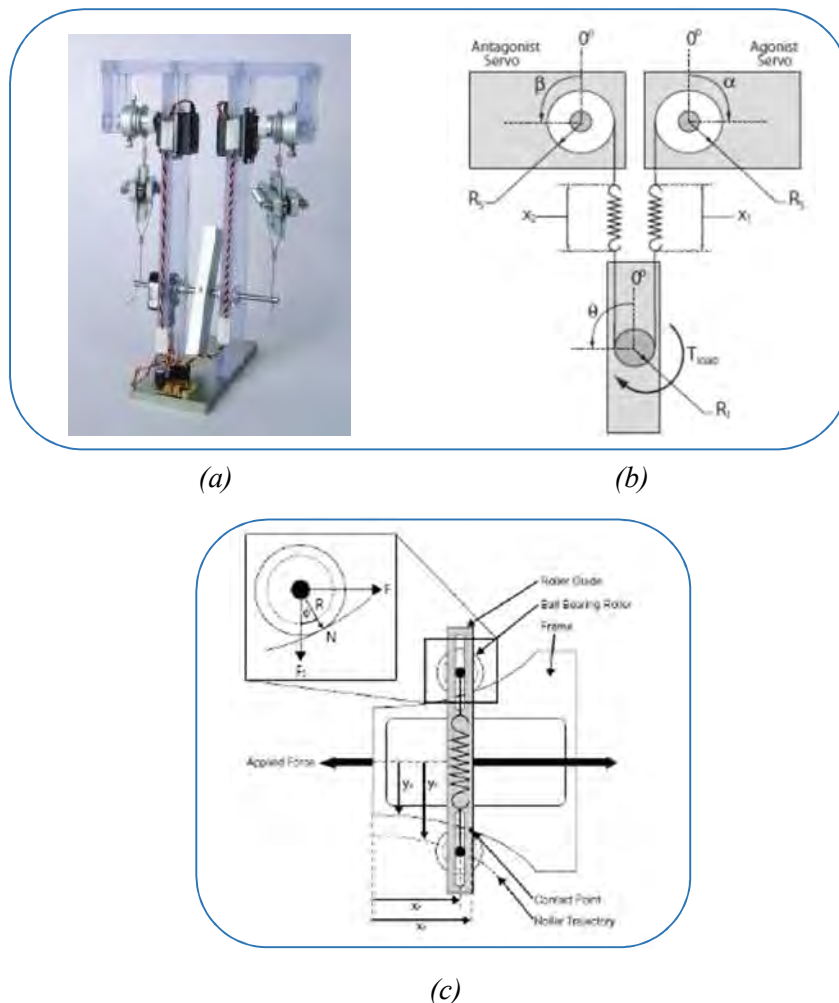


Figura 2.9: VSA diseñado por Migliore.

Cuando los dos servomotores giran en la misma dirección, la posición de equilibrio de la articulación cambia. Si el giro se realiza en sentido contrario, la rigidez de la articulación se puede variar. La ventaja de este diseño radica en que la característica fuerza-elongación de los resortes se elige durante la fase de diseño. Los principales inconvenientes son el tamaño, la complejidad adicional y la fricción de los mecanismos, que producen que los resortes se comporten como un sistema de segundo orden.

Otros sistemas antagonistas que incorporan resortes cuadráticos se incluyen en (Koganezawa, et al., 2006) y (English & Russell, 1999). Sin embargo, más allá de la

forma cuadrática en la relación fuerza-elongación, en esta implementación se debe destacar el uso de piezas curvadas (levas), que sirven de guías para el movimiento de elongación y compresión de resortes lineales, posibilitando así diseñar características de rigidez no lineal acorde a los deseos de la implementación.

En la figura 2.10 se puede observar diferentes aplicaciones antagónicas basadas en la creación de relaciones no lineales, producto del rodamiento sobre piezas curvas.

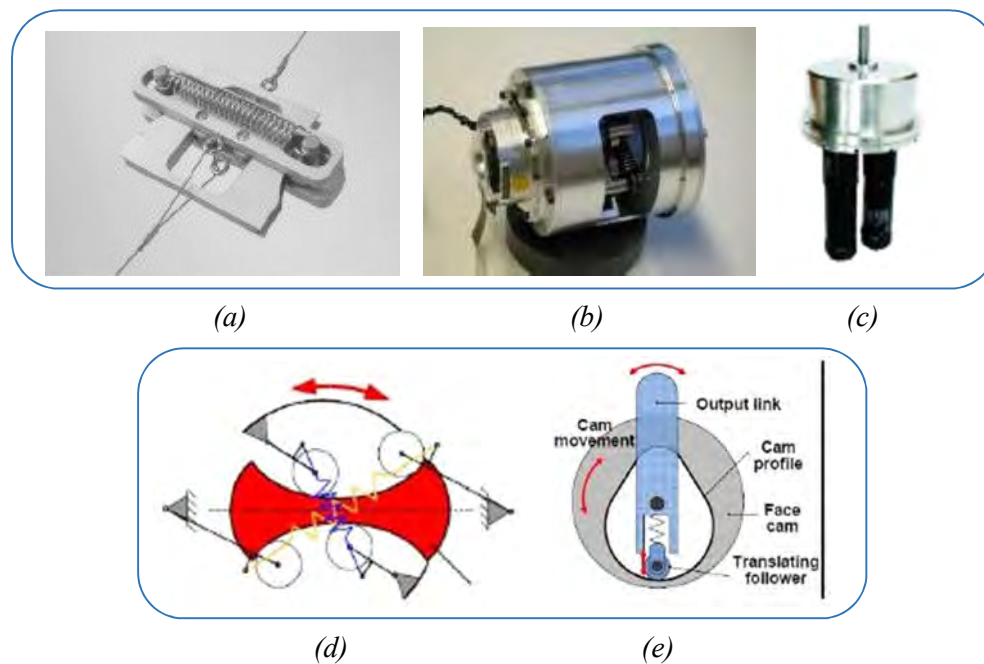


Figura 2.10: Múltiples métodos de variar la rigidez.

Tonietti (Tonietti, et al., 2005) plantea un VSA antagónico de tipo cruzado. En la figura 2.11 se puede apreciar que este dispositivo está formado por tres poleas (1, 2 y 3) sobre las cuales, se sitúa una correa. Dos de las poleas (2 y 3) están controladas, cada una por un servomotor (5 y 6). La otra polea (1) está conectada al brazo (4). Tres mecanismos de tensión (7, 8 y 9) se disponen sobre la correa que une a estas tres poleas. Aunque los tres mecanismos de tensión son iguales, su función es diferente. Dos mecanismos de tensión (8 y 9), vecinos de la polea conectada al brazo, están formados por resortes que ayudan a crear una dinámica no lineal. El último mecanismo (7), sirve simplemente para mantener la tensión de la correa en contra las otras dos poleas.

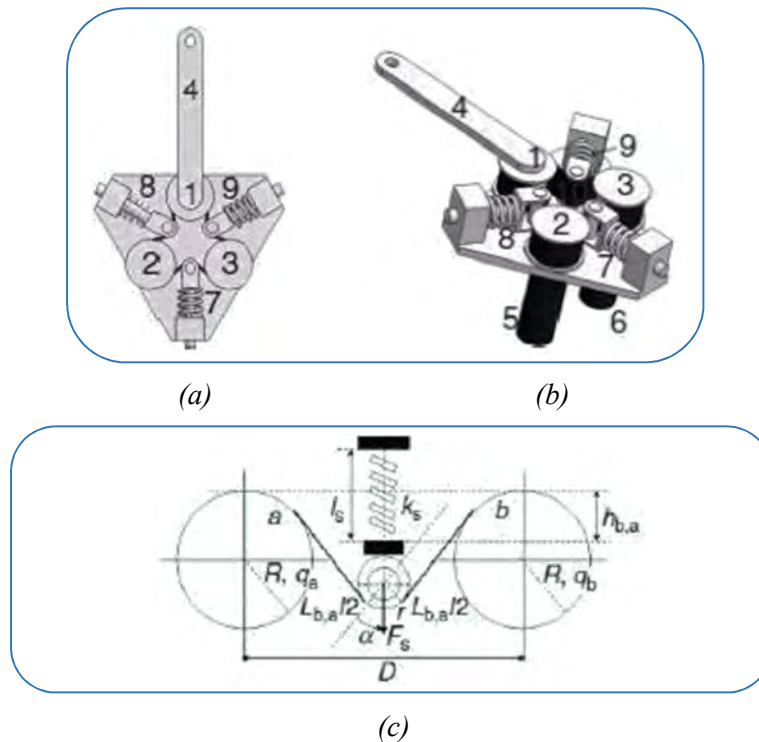


Figura 2.11: VSA diseñado por Tonietti.

Como se puede notar, este VSA es implementado realmente con dos SEA's: el formado por los elementos 2, 5, 8 y otro por los elementos 3, 6, 9. Los dos resortes 8 y 9 de cada SEA son lineales, pero debido a los mecanismos de tensión, se hacen no lineales.

En la figura 2.11 (c), se puede observar el mecanismo que produce que los resortes tengan un comportamiento no lineal. La circunferencia ilustrada en la parte izquierda, representa la polea con el brazo (1). La circunferencia derecha representa la polea, ya sea 2 o 3. Se debe destacar en esta misma figura, que la longitud del resorte es una función no lineal de la longitud de la correa entre las dos poleas.

Para hacer más rígido el VSA, la polea 2 junto con el motor 5, han de girar en sentido antihorario, mientras que la polea 3 con el motor 6 deben hacerlo en sentido horario. Como resultado, los resortes 8 y 9 se comprimen, y el resorte 7 se expande para mantener la correa oprimida contra las poleas. En el caso que las poleas 2 y 3 giren en la misma dirección, la longitud de los resortes no cambiará. Así pues, la rigidez se mantiene igual, pero la posición de equilibrio varía.

Para cada configuración antagonista, ambos actuadores se deben utilizar con el objetivo de influir en una sola variable: la rigidez o la posición de equilibrio. El control de esta implementación es más dificultoso que el diseño anterior, ya que la no linealidad es más compleja.

El VSA-II también es un diseño antagonista que se ha concebido para disponer de mayor capacidad de par en un montaje más compacto. El objetivo de este sistema de transmisión es conseguir una característica no lineal entre el par de entrada aplicado por

los motores y la desviación angular del eje la de articulación. El elemento básico de transmisión es un mecanismo de cuatro barras también llamado “*Grashof neutral linkage*” (Figura 2.12 (a)).

Está constituido por dos pequeños eslabones (AB, BC) y dos eslabones grandes (OA, OC). El eslabón OA está conectado a un motor en O y produce un movimiento angular β con respecto al eslabón de tierra OC. El eslabón AC es cargado por el resorte de torsión lineal en C. Mediante un adecuado diseño de las longitudes de los eslabones, es posible obtener la no-linealidad.

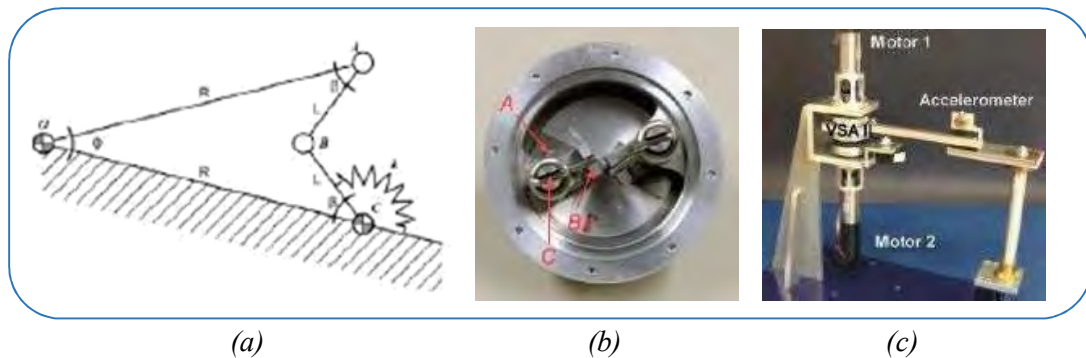


Figura 2.12: VSA-II.

Por lo tanto, para crear el VSA-II, dos pares de tales mecanismos de cuatro barras se combinan para cada motor y, los dos motores se montan en modo antagónico, tal y como se ilustra en la figura 2.12 (b) y 2.12 (c). La diferencia sustancial entre el VSA-I y II radica en que mientras en el primero, el aumento de par motor externo induce una mayor rigidez, en el segundo, cualquier incremento en el par de carga produce que la rigidez disminuya. En el VSA-II, la rigidez máxima está limitada por el par del motor, mientras que en el VSA-I depende de la carga aplicada. En ambos dispositivos, el efecto de aumentar la carga externa produce una reducción del rango de rigidez.

Otro diseño basado en el mismo principio, es el actuador mecánicamente ajustable (AMASC), concebido por Hurst (Hurst, et al., 2004). Tal y como se muestra en la figura 2.13, AMASC es un mecanismo con gran complejidad que integra un considerable número de poleas y cables. Sin embargo, la ventaja se centra en la utilización de un único actuador para controlar cada variable (rigidez o posición de equilibrio). El resultado obtenido muestra que cada actuador tiene su función específica, lo que permite utilizar diferentes tipos de motores para optimizar el peso del sistema completo. El principio de funcionamiento está basado igualmente en la configuración antagónica de dos resortes no lineales.

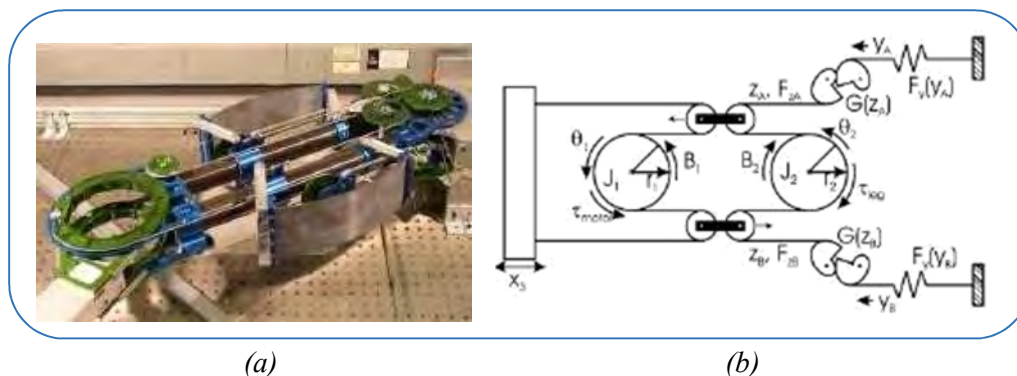


Figura 2.13: Actuador mecánicamente ajustable AMASC.

La figura 2.13 (b) muestra un esquema del AMASC. Los resortes F_y están compuestos por fibra de vidrio, y son dispuestos a ambos lados del prototipo (Figura 2.13 (a)). Para AMASC, el resorte no lineal está conformado por un conjunto de poleas en forma de espiral. La relación de reducción de las poleas varía proporcionalmente con la desviación del resorte de fibra de vidrio, obteniéndose una relación cuadrática. Las poleas, también tienen como finalidad desacoplar el control de rigidez y la posición de equilibrio.

El eslabón del robot se ubica en la polea J2. Un motor controla el ángulo de la polea J1, que tiene como propósito el ajuste de la posición de equilibrio. Cuando dicho motor gira en sentido antihorario, el conjunto de poleas flotantes ZA se moverá en sentido izquierdo, y el grupo de poleas flotantes ZB se moverá en sentido derecho. Este desplazamiento se traducirá en un giro del eslabón hacia la izquierda. Todo ello, se puede llevar a cabo sin variar la longitud de los resortes, lo que mantiene la rigidez constante.

Por otra parte, cuando el desplazamiento X_3 (controlado por el segundo motor) se produce hacia la izquierda, los dos conjuntos de poleas ZA y ZB también se moverán en el mismo sentido. Esto permite estirar ambos resortes, generando más rigidez en el conjunto, al mismo tiempo que la posición de equilibrio se mantiene constante.

AMASC es un actuador en el que tanto la rigidez, como la posición de equilibrio, se pueden controlar de manera independiente, cada una por un motor dedicado. Dicha independencia hace que el control sea más fácil, permitiendo el diseño de los dos motores por separado para satisfacer las demandas de una aplicación específica. Por ejemplo, la rigidez varía lentamente, mientras que la posición de equilibrio se tiene que lograr con mayor rapidez.

La principal desventaja del AMASC es notoriamente su complejidad.

Basándose en este concepto, se diseñó el robot bípedo BiMASC. En este caso, la rigidez completa de la pierna puede modificarse, en vez de únicamente la rigidez de las articulaciones. Thorson (Thorson, et al., 2007) desarrolló una variante lineal, donde el control de la posición de equilibrio y la rigidez son realizados por dos motores separados.

Otras aplicaciones antagónicas utilizan músculos artificiales neumáticos (PAM).

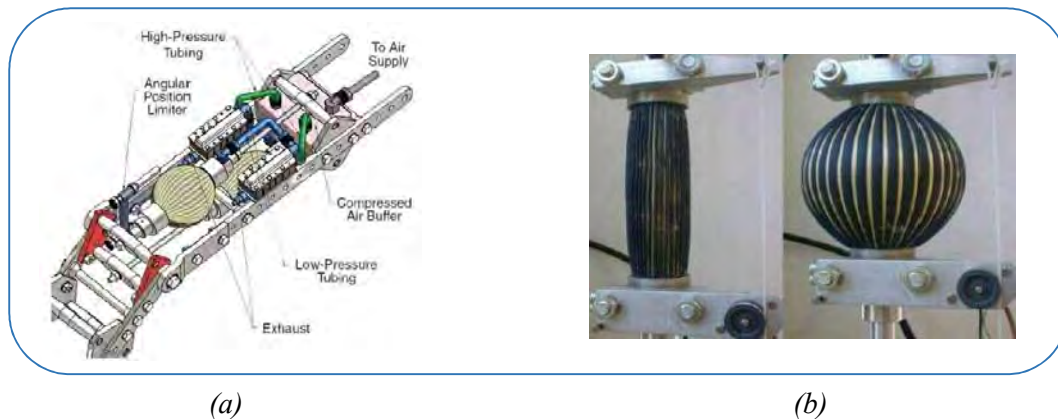


Figura 2.14: Dispositivo músculo neumático plegado (PDMA): (a) Esquema mecánico y (b) Comportamiento de músculo neumático.

Cuando se aplica aire comprimido, el músculo se contrae en sentido axial mientras se expande radialmente. La compresibilidad del aire los hace comportarse de un modo similar a un resorte.

El músculo McKibben (Chou & Hannaford, 1996) es el diseño más conocido. Su forma se asemeja a un cilindro delgado, que es fácil de implementar en dispositivos robóticos. Sin embargo, los inconvenientes residen principalmente en la histéresis introducida por la fricción, el importante umbral de presión para generar la fuerza y la necesidad de aire comprimido. El PDMA (Músculo neumático plegado) es un modelo de músculo que dispone de una membrana plegada con capacidad para expandirse, y debido a su forma de despliegue, prácticamente no tiene umbral de presión, la histéresis se reduce, y la contracción producida es mayor que la de un músculo neumático tradicional (Van Damme, et al., 2010). Además, disponen de una elevada relación fuerza-peso y se pueden acoplar directamente en la estructura sin la necesidad de complejos mecanismos de engranaje. La figura 2.14 ilustra una implementación del PDMA en el bípedo “Lucy” (Verrelst, et al., 2005).

Una modificación a la configuración antagonista es conocida como DM2. El enfoque del DM2 (Zinn, et al., 2002a) consiste en dividir la fuerza necesaria para conseguir mover los eslabones de un brazo robótico. Para ello se incluyen dos tipos de actuadores, distribuidos a en diferentes lugares del manipulador. Uno dedicado a las componentes de baja frecuencia, y otro para las altas frecuencias. Los dos actuadores están conectados en paralelo a la misma articulación: el lento, proporciona un alto par a costa de una inercia grande, y se acopla a través de una transmisión elástica pasiva (denominado actuador “macro”); el motor rápido, tiene un par limitado, pero la inercia del rotor es muy baja (denominado actuador “micro”).

Con ello, el DM2 busca aislar la alta inercia de los actuadores, de la inercia de los elementos móviles mediante la inclusión de una transmisión elástica pasiva, y así, optimizar el desempeño mediante el actuador micro ubicado directamente en las articulaciones. El par total se consigue separar así, en baja y alta frecuencia, ubicando los actuadores en diferentes puntos del brazo para ser más efectivos.

Una implementación novedosa de este enfoque fue desarrollada en la Universidad de Stamford (Shin, et al., 2010) (Figura 2.15). Ofrece una combinación de alta potencia, baja impedancia y un control preciso.

Para ello, se vale de cuatro músculos neumáticos como actuadores macro ubicados en la base del manipulador. Ellos representan a los actuadores de baja frecuencia y son la fuente principal de energía mecánica. Dispone así mismo, de un motor eléctrico como actuador micro, ubicado directamente sobre la articulación para así disponer de la posibilidad de obtener una respuesta rápida y precisa. De esta manera, se logra tener una baja impedancia tanto en alta, como en baja frecuencia. El pequeño motor eléctrico compensa el bajo dinamismo del músculo neumático (de baja inercia y buena relación fuerza-tamaño) de forma que el accionamiento híbrido puede lograr un mayor ancho de banda. El tamaño compacto del regulador de presión permite controlar el músculo neumático localmente sin aumentar la resistencia al flujo de manera significativa. Los reguladores se pueden montar fácilmente en el interior de los eslabones, sin un aumentar significativamente la complejidad o el peso del mismo.

Variación de la estructura

Una alternativa a la configuración de dos resortes antagonistas no lineales, es la variación de la rigidez mediante la manipulación de la estructura eficaz del resorte, también llamado SCS (*Structure Control Stiffness*) (Bharadwaj, et al., 2005). Ejemplo de ello, son mecanismos donde el momento de inercia o la longitud del elemento elástico varían.

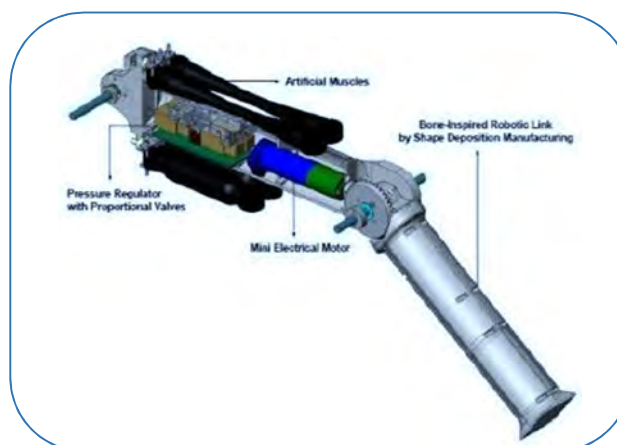


Figura 2.15: Diseño DM2 de la Universidad de Stamford.

Kawamura (Kawamura, et al., 2002) sugiere un dispositivo consistente en un conjunto de láminas delgadas de vidrio laminado, cubiertas por una cámara de plástico hermético (Figura 2.16).

Cuando la fuerza externa dobla el elemento laminado, el cuerpo se curva. Pero, si la cámara de plástico crea el vacío, las láminas son fuertemente conectadas entre sí y las hojas no se deslizan gracias a la fricción. Así pues, la rigidez del elemento es variable mediante el control de la presión de vacío en la cámara de plástico.

Las ventajas de este sistema residen en la sencillez de su construcción y la amplia gama de rigidez que es posible conseguir. Sin embargo, la fricción hace que el control preciso sea difícil de conseguir.

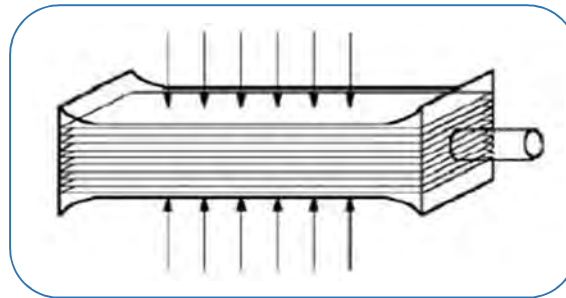


Figura 2.16: Dispositivo con estructura laminar.

Otra manera distinta de ajustar la rigidez es variar la longitud efectiva de un elemento flexible. La figura 2.17 (a), muestra un dispositivo para el ajuste de la rigidez a través del cambio de longitud (Morita & Sugano, 1995).

El dispositivo está formado por una lámina metálica conectada a una articulación mediante un cable y una polea.

La longitud efectiva del resorte puede ser modificada por un elemento deslizante.

Un rodillo se coloca en la pieza deslizante para prensar la lámina metálica contra la estructura. El motor hace girar el tornillo sin fin, el cual mueve al deslizador, produciendo un cambio de la longitud efectiva de la lámina metálica que actúa como elemento flexible.

En la figura 2.17 (b), se ilustra un dispositivo con algo más de complejidad en su diseño mecánico, pero que está basado en el mismo principio de operación (Choi, et al., 2009). La rigidez se genera mediante cuatro láminas metálicas flexibles, que se adjuntan al eje; cada una separada por noventa grados. Uno de los extremos de cada lámina está conectado al eje y el otro extremo, es prensado por un par de rodillos deslizantes. El sistema formado por el par de rodillos que prensan a cada lámina, esta mecánicamente asociado con el de todas las láminas. Esto permite que motor dedicado al control de rigidez tenga la posibilidad de desplazar los rodillos simultáneamente sobre las cuatro láminas y así, variar la longitud efectiva de las mismas de manera uniforme.

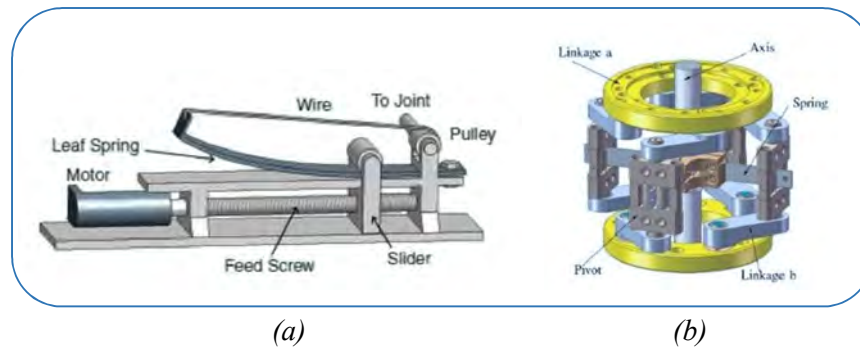


Figura 2.17: Cambio por longitud: (a) Dispositivo básico de lámina, (b) Dispositivo de 4 láminas.

Una versión rotacional se desarrolló (Morita & Sugano, 1997) para su aplicación en una articulación robótica. En la figura 2.18 se muestra un dibujo conceptual del diseño propuesto, donde se observa la situación en la que el mecanismo es poco rígido (Figura 2.18 (a)) y cuando es muy rígido (Figura 2.18 (b)). Los dos ejes verticales, que son accionados por un motor, pueden moverse deslizándose hacia arriba y hacia abajo. Cuando el deslizador, formado por cuatro ruedas, se mueve hacia arriba, la longitud efectiva de la lámina metálica se reduce.

Una ventaja de estos dos mecanismos, es que son fáciles de construir. Igualmente, son fáciles de controlar debido a que la configuración de rigidez y la posición de equilibrio son completamente independientes (Morita & Sugano, 1997). Este mecanismo permite todos los posibles valores de rigidez entre un mínimo y un máximo.

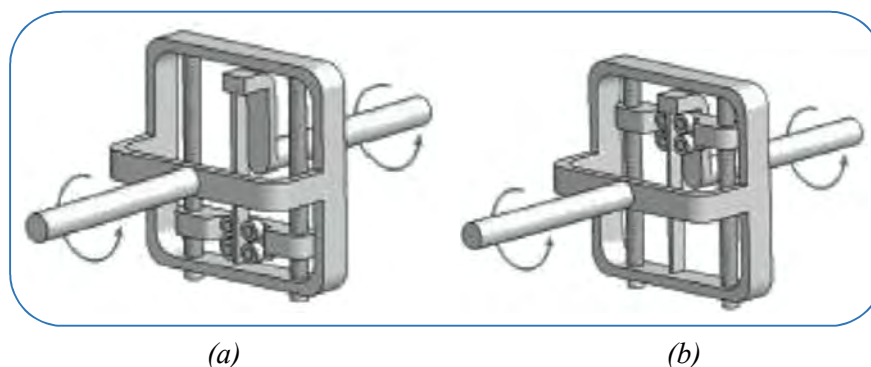


Figura 2.18: Mecanismo rotacional: (a) Configuración de mínima rigidez y (b) Configuración de máxima rigidez.

Esto implica que existe un actuador para el control de rigidez y un actuador para la posición de equilibrio con control independiente.

Otro actuador, centrado en el concepto de rigidez de estructura controlada, fue presentado en (Hollander, et al., 2005) y es conocido como resorte “Jack”.

El ajuste del mecanismo se consigue añadiendo o restando el número de vueltas que conforman el resorte. Un diagrama conceptual de este dispositivo puede observarse en la figura 2.19. A través de la rotación del resorte o del eje, se pueden añadir o restar el número de espiras activas, cambiando así la rigidez efectiva de la estructura.

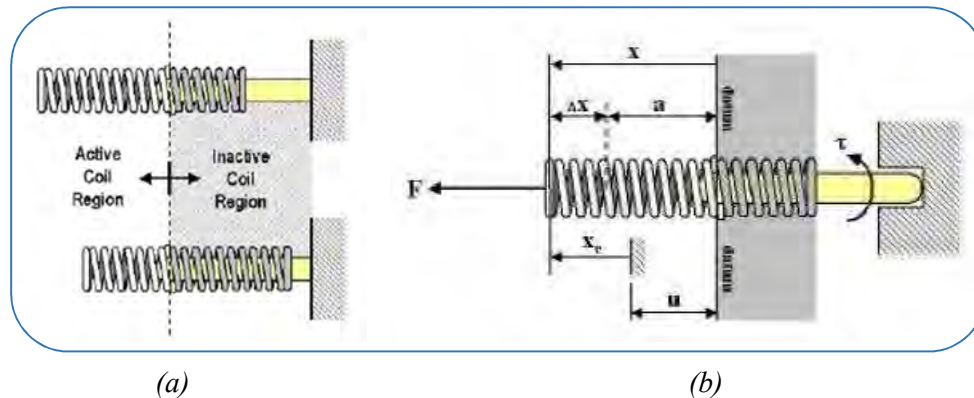


Figura 2.19: Resorte Jack.

Una innovación que recientemente se está aplicando en este tipo de técnicas de control de rigidez, se basa en el uso de fluidos magneto-reológicos (fluidos MR).

Estos fluidos son líquidos aceitosos que puede cambiar a un estado cuasisólido en fracciones de segundo, cuando son expuestos a un campo magnético para luego, regresar al estado líquido mediante la eliminación del campo. Por sus notables características, los fluidos MR se investigan como base del diseño de novedosos sistemas mecánicos. Entre estos se encuentran: sistemas semiactivos de control de vibraciones, reguladores de flujo, frenos hidráulicos, prótesis y sistemas de pulido óptico.

Algunas investigaciones (Ahmed, 2011) (Kikuchi, et al., 2009) han estudiado el uso de estos fluidos dentro de reductoras o embragues. Haciendo variar la viscosidad del fluido, se puede controlar la rigidez articular del brazo. En la figura 2.20 (a) se puede apreciar un embrague rotacional comercial, en el que existe una delgada capa de fluido magnetoreológico en los extremos del disco de frenado (rotor). Cuando la bobina es excitada, se produce un campo magnético que aplica rigidez el fluido. De esta manera, el eje que está conectado rígidamente a un motor, se hace aún más rígido.

En la figura 2.20 (b) se ilustra un robot plano de dos grados de libertad, diseñado en la Universidad de Orebro, para estudiar el diseño de robots seguros en aplicaciones pHRI.

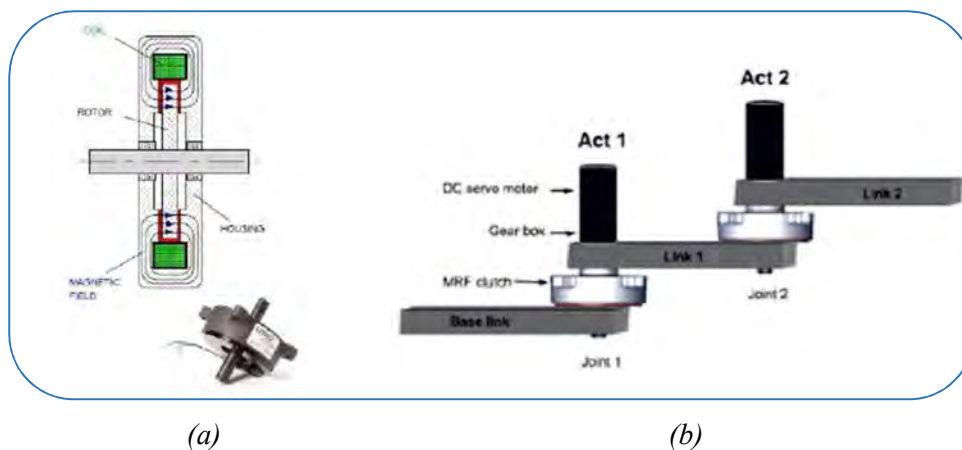


Figura 2.20: Fluidos magnetoreológicos: (a) Embrague MR y (b) Robot plano con embragues MR.

Variación mecánica

Otra alternativa, son los actuadores basados en la rigidez mecánica controlada. Una primera implementación fue desarrollada en la Universidad Vrije de Bruselas.

Como se observa en la figura 2.21, el sistema propuesto consiste en una articulación con un eslabón fijo (1) y uno móvil (2), conectados por un eje (8). El eslabón restante (3), es ubicado igualmente en el mismo eje de rotación. La posición del eslabón 3, en relación al 1, puede ser controlada por el servomotor 4. El resorte 7, genera un par que tiende a alinear 2 y 3. Esta fuerza de restauración se transmite por el cable 9 que liga un punto en el eslabón 3 con un punto en el eslabón 2.

Los servomotores 5 y 6 producen un giro en los ejes roscados que mueven dichos puntos, lo que genera un esfuerzo de torsión inferior o superior. La figura 2.21 (a) muestra la situación que resulta en una articulación con rigidez baja. En la figura 2.21 (b), se muestra la situación que hace más rígida la articulación.

La variación de la rigidez está basada en la variación de la longitud y usa sólo un elemento pasivo, que es completamente diferente de la configuración antagonista o la rigidez estructural controlada.

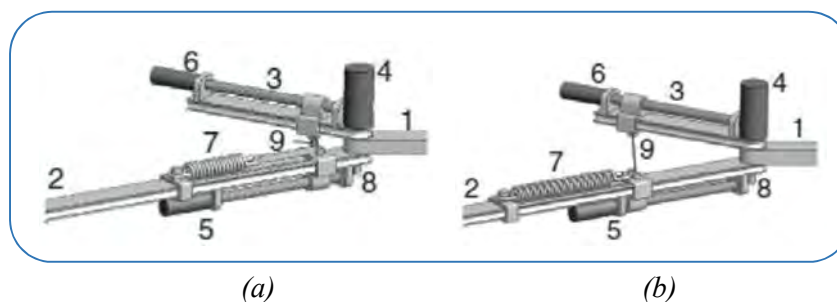


Figura 2.21: Sistema de la Universidad Vrije.

Este diseño tiene una serie de inconvenientes evidentes. La utilización de tres motores, de los cuales, dos son controlados en conjunto, implican costo y dificultad de implementación. Por razones prácticas, los dos puntos que aseguran el cable no pueden ser colocados a la misma distancia del eje de rotación, dando lugar a la no linealidad de la característica par-ángulo para ángulos pequeños. En el caso de ángulos grandes, la característica par-ángulo se convertirá en no lineal, ya que el cable sigue una línea recta (una cuerda) en lugar de un arco, con el eje de rotación como centro.

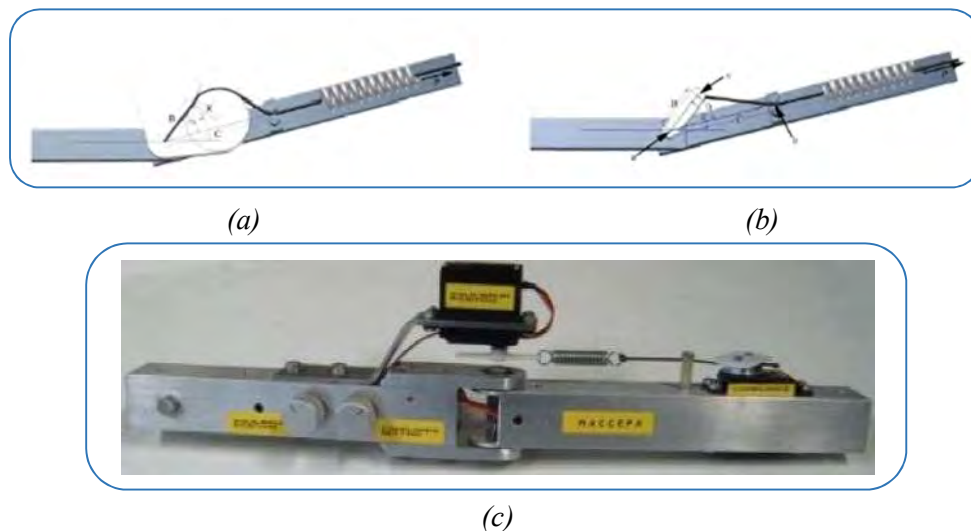


Figura 2.22: MACCEPA: vista superior del MACCEPA 1.0 y vista superior del MACCEPA 2.0

En la figura 2.22, se muestran las partes esenciales del diseño, denominado como MACCEPA (Ham, et al., 2007). Como puede observarse, existen también tres cuerpos girando alrededor de un eje de rotación.

Un eslabón de palanca tiene la función de pivote, representado como un cuerpo pequeño en la figura 2.22 (a). Un resorte se coloca entre un punto c en el eslabón pivote y un punto b a la derecha del cuerpo. El ángulo φ entre el eslabón pivote y el cuerpo de la izquierda, se establece por un actuador (por ejemplo, un servomotor).

Cuando α (el ángulo entre el eslabón pivote y el derecho) es diferente de cero, la fuerza debida a la elongación del resorte generará un par de torsión τ que tiende a alinear el cuerpo derecho con el eslabón de palanca. Cuando el ángulo α es igual a cero (posición de equilibrio), el resorte no generará ningún par.

La posición de equilibrio está determinada por el valor de φ . Un segundo actuador en el mecanismo de pretensión del punto b , determina la longitud del cable entre los puntos c y b , estableciendo así la tensión del resorte. Esta tensión, influirá en el par de un cierto ángulo α , controlando así la constante elástica del resorte de torsión.

En la figura 2.22 (c), ilustra una fotografía de MACCEPA 1.0. La versión más reciente de este dispositivo (MACCEPA 2.0), muestra una leve modificación, ilustrada en la figura 2.22 (b).

Consiste en sustituir el eslabón pivote por un disco con un particular perfil, modificando así la forma de la relación par-ángulo y, consecuentemente, la curva de rigidez (haciéndola lineal) (Tsagarakis, et al., 2009).

Entre las ventajas del sistema MACCEPA, se destacan la facilidad para ser construido con componentes comerciales y la tenencia de la característica ángulo-par lineal en su segunda versión. El control de la rigidez y la posición de equilibrio son completamente independientes, y estas señales de control son independientes de la posición actual. Sin embargo, la fricción en la articulación depende de la configuración de la rigidez, y los servomotores requieren de algo de espacio en la estructura.

Recientemente, este nuevo concepto se aplica en dos robots bípedos (Ham, et al., 2007), (Mao, et al., 2007) y en un dispositivo de rehabilitación para codo desarrollado por Sulzer (Sulzer, et al., 2005).

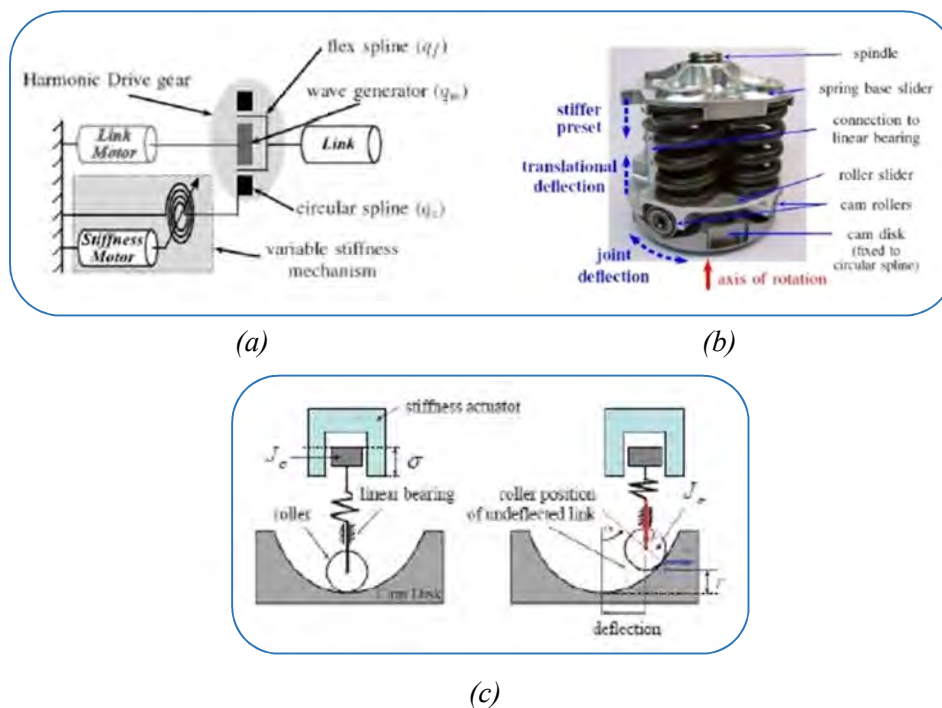


Figura 2.23: Rigidez articular variable (VS-Joint).

Por otra parte, el DLR (Centro Aeroespacial Alemán) plantea otro dispositivo basado en rigidez controlada mecánicamente, conocido como *VS-Joint* (Wolf & Hirzinger, 2008).

Este dispositivo incluye dos motores de diferente tamaño. El motor de mayor potencia, modifica la posición de eslabón. La rigidez de la articulación, es ajustada por un motor mucho más pequeño y ligero, que cambia la característica del mecanismo de apoyo. La figura 2.23 (b) muestra una fotografía que señala las partes de este dispositivo. El disco de levas (parte inferior) se conecta a la articulación. La posición vertical de la base que sostiene a los resortes (*spring base slider*) es controlada por el motor pequeño,

que actúa sobre el eje (*spindle*) y permite establecer la rigidez, dado que dicha placa superior comprime a los resortes.

El principio de funcionamiento se ilustra en el esquema de la figura 2.23 (c).

Una desviación del eslabón, causa un desplazamiento del disco de leva (*Cam disk*), que se ve compensada por el rodillo que presiona sobre ella en la dirección axial por el resorte. Esto genera una fuerza de centrado, causando el momento de salida en el eslabón. Para modificar la rigidez predeterminada, el motor más pequeño mueve la base de resortes axialmente al disco de leva y, como consecuencia, varía la fuerza del resorte.

La ventaja de este diseño radica en que puede ser fácilmente integrado en un brazo robótico. La forma de la leva se puede ajustar para obtener un comportamiento progresivo, decreciente, o lineal.

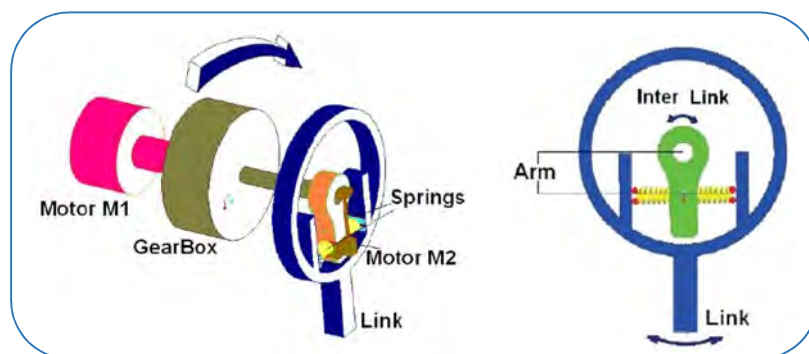


Figura 2.24: Dispositivo AwAW.

Otra forma de variar la rigidez, asociadas a estas técnicas de variación mecánica, consiste en desplazar el punto de fijación de los elementos flexibles.

Un claro ejemplo de esta aplicación, es el dispositivo denominado AwAW (Jafari, et al., 2010), el cual se ilustra en las figuras 2.24 y 2.25.

En este caso, dos resortes antagonistas están conectados por un extremo a un pequeño eslabón interno y por el otro, al eslabón de salida. El eslabón interno está rígidamente unido al motor principal de la articulación. El brazo de palanca se define como la distancia entre el centro de rotación de la articulación y el punto de junta de los resortes sobre el eslabón interno. Un mecanismo de posicionamiento dirigido por otro motor, permite controlar la longitud del brazo, moviendo los dos resortes hacia el centro de rotación (para reducir la rigidez) o lejos del centro de rotación (para aumentar la rigidez). La fuerza generada por los resortes es perpendicular al desplazamiento necesario para cambiar la rigidez, por lo que una pequeña cantidad de energía es necesaria para ajustar la rigidez. Debido a esta propiedad, el motor que controla la rigidez puede ser significativamente menor que en otros diseños de actuadores de rigidez variable.

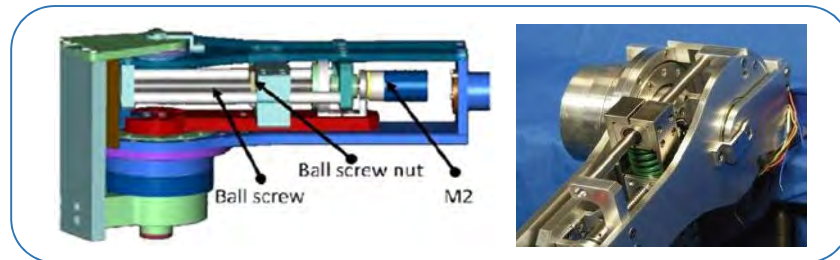


Figura 2.25: Modelo CAD (izquierda) y prototipo del AwAW (derecha).

Una ventaja adicional de este diseño, es que no requiere del uso de resortes no-lineales o de mecanismos no-lineales de desplazamiento. En la figura 2.26 se muestran otros dos dispositivos con una estrategia de ajuste de rigidez similar (Ghorbani & Wu, 2006) (Kim & Song, 2010).

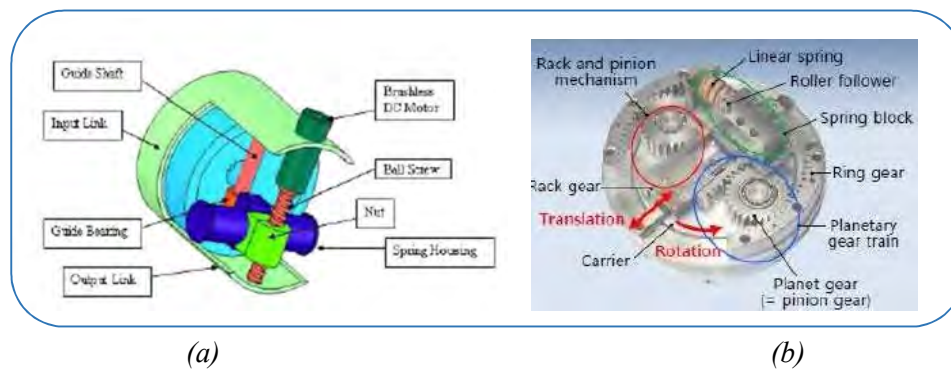


Figura 2.26: Otros dispositivos por control de par: (a) El dispositivo de Reza y (b) HDAU.

2.2.1.3 Embragues con flexibilidad articular

El embrague con flexibilidad articular es un sistema que permite tanto transmitir como interrumpir la transmisión de una energía mecánica a su acción final de manera voluntaria mediante un elemento elástico.

En éste, se integran bajo el mismo mecanismo los conceptos de embrague tradicional y articulación flexible, consiguiendo un comportamiento de transmisión progresiva entre comportamientos rígido-flexibles.

2.2.2 Características de los dispositivos con flexibilidad articular

Generalmente, los dispositivos que incorporan flexibilidad en las articulaciones cuentan con un mayor número de grados de libertad y de entradas. Adicionalmente puede contar con más motores o elementos elásticos (Figura 2.27)

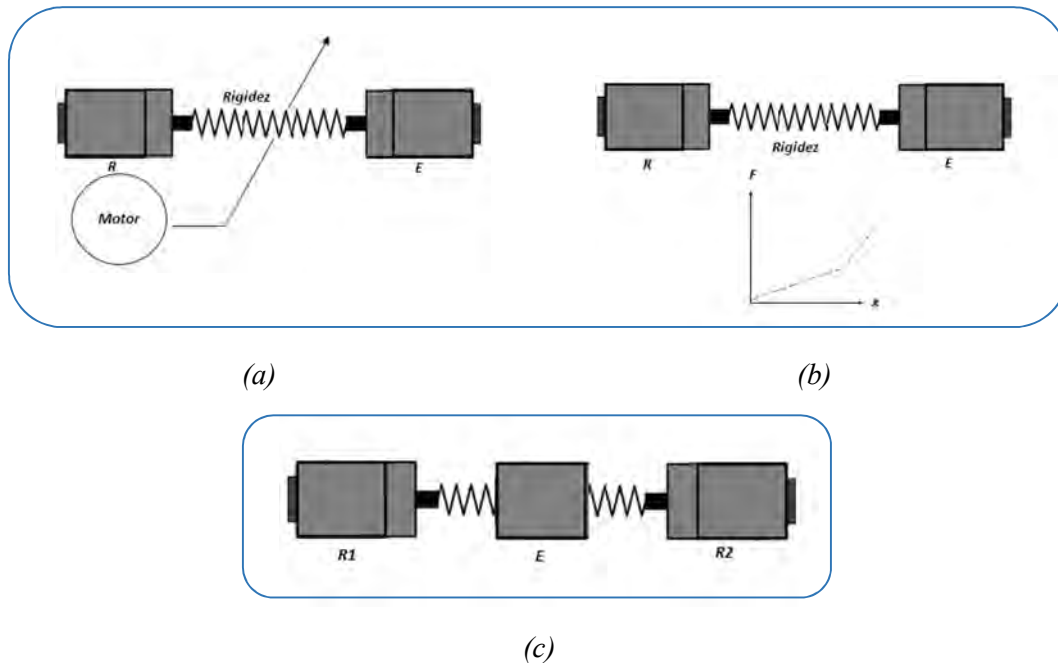


Figura 2.27: Elementos que actúan dependiendo del tipo de flexibilidad articular: (a) Rigidez variable por variación del punto de equilibrio mediante motor, (b) Rigidez variable por variación del punto de equilibrio mediante resorte no lineal y (c) Rigidez variable por configuración antagonista.

Se debe tener en cuenta que en robots complejos, la presencia de flexibilidad en los eslabones también se hace presente en los elementos de transmisión/reducción como correas, ejes largos, cables, *harmonic-drives* o engranajes. El propósito de estos componentes es permitir el agrupamiento de los actuadores cerca de la base del robot, para mejorar la eficiencia dinámica o reducir el gasto energético. Ahora bien, cuando se producen las fuerzas/pares derivados de la operación del robot, éstos componentes son intrínsecamente flexibles (e.g. *flexspline* de *harmonic-drive*; figura 2.28). Ésta flexibilidad interna de los eslabones también tiene efectos positivos en la reducción del daño, sin embargo ésta se encuentra limitada por la funcionalidad del robot y la capacidad de posicionar con precisión el efector final (De Luca, 2008).

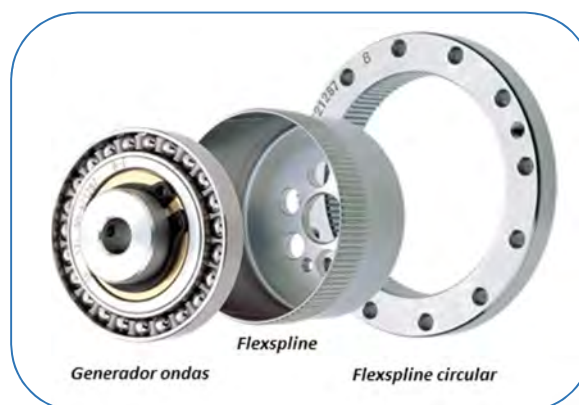


Figura 2.28: Elementos internos de Harmonic-Drive.

2.3 Instrumentación para la caracterización y evaluación de los actuadores con flexibilidad articular

Por definición, la instrumentación engloba el conjunto de herramientas que permiten realizar la medición, conversión, control y transmisión de las variables. En otras palabras, la instrumentación es la ventana a la realidad de lo que está sucediendo en el proceso, lo cual servirá para determinar si el mismo va encaminado hacia el fin deseado; y en caso de no ser así, se podría usar para actuar sobre los parámetros del sistema y proceder de forma analítica o correctiva si fuera necesario (Figura 2.29).

Es importante destacar, que la instrumentación es lo que ha permitido el gran avance tecnológico actual en casos tales como la automatización de los procesos; ya que dicha automatización es solo posible a través de elementos que puedan sensor lo que sucede en el ambiente, para luego tomar una acción de control pre-programada que actúe sobre el sistema para obtener el resultado previsto.

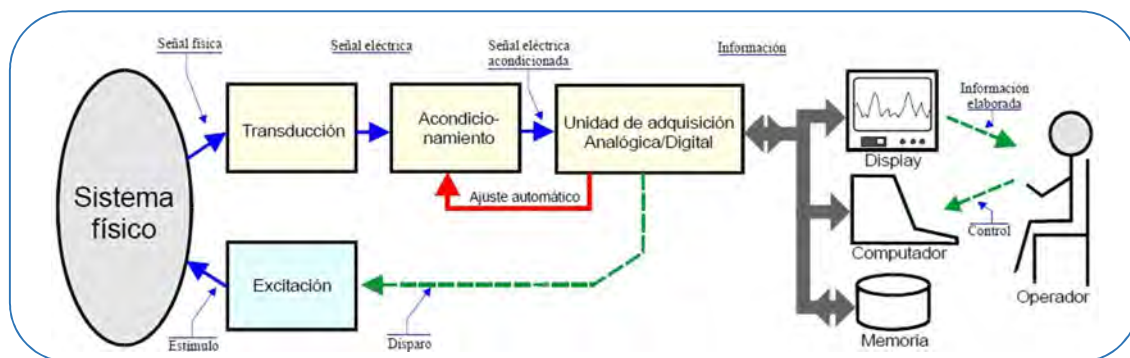


Figura 2.29: Esquema de adquisición de medidas de un sistema físico a través de la instrumentación.

En este estudio, dicha capacidad para adquirir datos del banco de ensayos donde los dispositivos AVASTT y MMJS modificaran su deformación elástica articular para así poder pasar de una estructura rígida, más precisa y rápida, a una estructura flexible, menos precisa pero mucho más segura, es fundamental; puesto que para obtener una caracterización detallada de los dispositivos en futuros estudios, se deben obtener datos concisos y característicos relacionados con las respuestas de los mecanismos ante colisiones inesperadas. Asimismo, dichas mediciones estarán directamente vinculadas a la identificación, control y respuesta de la bancada.

Algunos de los parámetros más destacados relacionados con el control de posición y la rigidez en las reacciones de colisión entre los VSA y los humanos son:

- Rango de rigidez de la articulación: viene dado por los límites de rigidez máxima y mínima que puede adoptar la articulación.
- Rango de desviación angular: la desviación angular es la diferencia entre la posición de equilibrio y la posición del eslabón sometido a una carga exterior. El

mecanismo debe permitir una amplitud de desviación angular suficiente, de manera que en caso de una sobrecarga (e.g. un impacto) no se alcance sus límites físicos.

- Relación rigidez vs desviación angular: es decir, como varía la rigidez conforme aumenta la desviación angular (curva de rigidez).
- Fuerza aplicada: contribución al daño en una situación de impacto entre el mecanismo y una cabeza humana.

Es por ello, que la instrumentación externa instalada estaba centrada en tres aspectos fundamentales: posición, fuerza/par y aceleración; estrechamente relacionados con las características de respuesta previamente mencionadas.

A continuación, se describen con mayor profundidad, los diferentes aparatos de medida utilizados, así como los principios de funcionamientos en los que se basan.

2.3.1 Sensores de posición

La función de los sensores de posición es medir o detectar el emplazamiento de un determinado objeto en el espacio. Dentro de este grupo, podemos encontrar los siguientes tipos de sensores:

- Posición lineal: establece la ubicación de un objeto frente a un marco de referencia, en el cual el desplazamiento, asumido como diferencia de posición, se ejecuta de manera lineal.
- Posición angular: establece la ubicación de un objeto frente a un marco de referencia, en el cual se ejecuta una trayectoria rotacional, donde el móvil tiene un solo grado de libertad. La posición se representa de manera suficiente mediante una sola cantidad, el ángulo.

El encoder incremental es un transductor rotativo que transforma un movimiento angular en una serie de impulsos digitales. Estos impulsos pueden ser utilizados para controlar los desplazamientos de tipo angular. El sistema de lectura se basa en la rotación de un disco graduado con un reticulado radial formado por líneas opacas, alternadas con espacios transparentes. Este conjunto es iluminado de modo perpendicular por una fuente de rayos infrarrojos. El disco proyecta de este modo su imagen sobre la superficie de diversos receptores, los cuales, tienen como tarea la detección de las variaciones de luz que se producen con el desplazamiento del disco, convirtiéndolas en las correspondientes variaciones eléctricas (Figura 2.30).

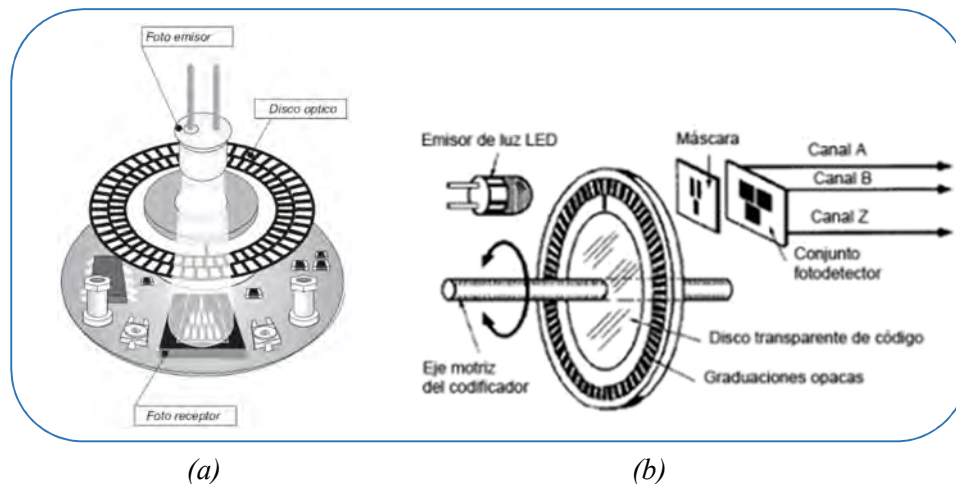


Figura 2.30: Sensor para la medida de posición (encoder): (a) Funcionamiento y (b) Partes que conforman el encoder.

Dentro de los diferentes modelos de encoder existentes, se destacarán dos, por su utilización en el banco de ensayos:

- Foto-sensor

Éstos proporcionan dos formas de onda cuadrada y desfasadas noventa grados entre sí, los cuales se nombran como “canal A” y “canal B”. Con la lectura de un solo canal, se dispone de la información correspondiente a la velocidad de rotación, mientras que si se capta también la señal B, es posible discriminar el sentido de rotación en base a la secuencia de datos que producen ambas señales. Además se dispone de otra señal más llamada “canal Z” o “Cero”, que proporciona la posición absoluta de cero del eje del encoder. Esta señal se presenta bajo la forma de impulso cuadrado con fase y amplitud centrada en el “canal A” (Figura 2.31).

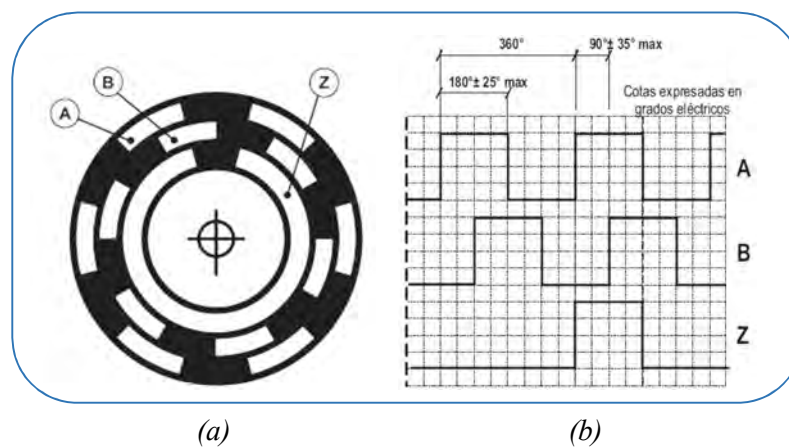


Figura 2.31: Principios de funcionamiento del encoder incremental: (a) Disco codificador y (b) Señales de salida.

- Magnéticos

Tienen como característica destacable la ausencia de rozamiento y contacto entre el elemento sensor y el detector. Generalmente hablamos de ruedas magnéticas de varios diámetros que tienen un código grabado. Este código es leído e interpretado por el cabezal que recoge esos impulsos magnéticos. El lector interpola los pulsos de la rueda, lo que permite configurar totalmente la resolución necesaria, partiendo desde unos pocos pulsos por vuelta, hasta más de trescientos mil, según el diámetro de rueda y el factor de escalado.

El resultado de este sistema es un encoder magnético con elementos separados, de resolución configurable y fácil montaje (Figura 2.32), lo que lo hace muy útil a la hora de instalarse en elementos nuevos y sobre todo en elementos ya en uso, en los que se hace difícil desmontar toda la mecánica para incorporar una medida de posición.

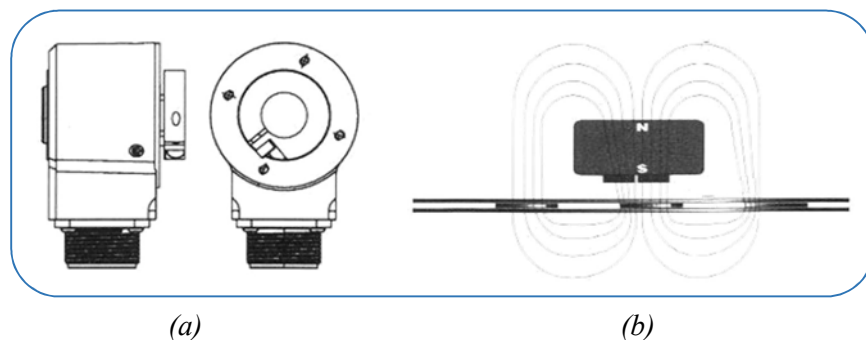


Figura 2.32: Ejemplos de encoder magnético: (a) Cabezal lector y (b) Cabezal junto con cinta detectora.

2.3.2 Sensores de fuerza

Los sensores de fuerza y torsión son transductores externos, que tienen por objeto la medida de las deformaciones superficiales de los cuerpos mediante un elemento elástico denominado célula de carga.

En las células de carga, unas galgas extensiométricas medirán dicha deformación y las convertirán en señales eléctricas proporcionales. Como se observa en la figura 2.33, éstas se basan en la variación de longitud y diámetro que se produce cuando un hilo de resistencia se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una presión.

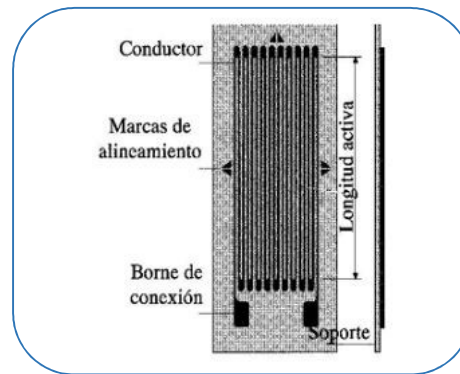


Figura 2.33: Construcción básica de una galga extensiométrica.

Los sensores de fuerza/par centrados en la medida multieje, están compuestos por células de carga triaxiales, que permiten la medida de fuerza y par en sus tres componentes X, Y, Z simultáneamente. Son muy utilizados en ensayos experimentales y para la modelización del comportamiento de estructuras en condiciones dinámicas, como es el caso de este estudio. El resultado es una matriz de fuerzas y momentos compensados internamente, cosa que no sería posible montando sensores independientes en cada una de las componentes (Figura 2.34).

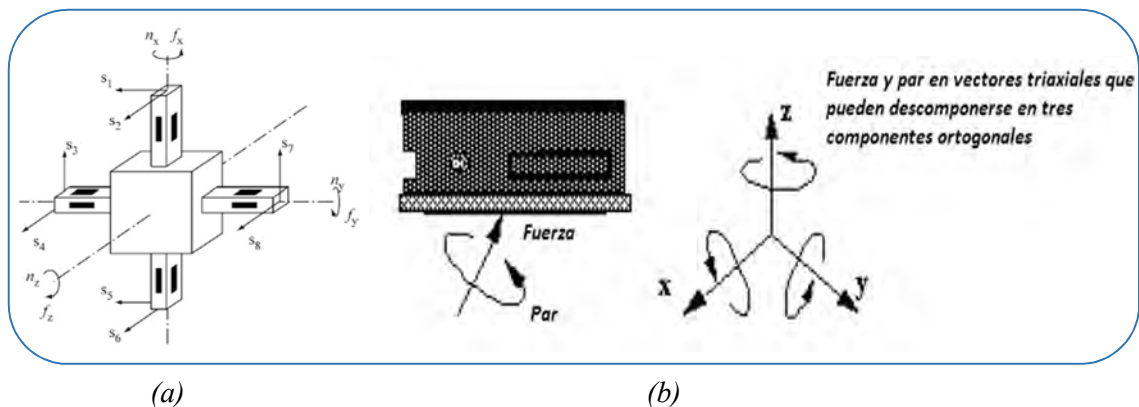


Figura 2.34: Sensor de fuerza/par: (a) y (b) Esquemas de medida multieje.

2.3.3 Acelerómetros

Como su nombre indica, estos tipos de transductores son capaces de realizar mediciones de aceleración asociadas con el fenómeno de peso experimentado por una masa de prueba, que se encuentra en el marco de referencia de un dispositivo. Con las señales captadas, se produce un voltaje de salida correspondiente a un estímulo de entrada, que en este caso, es la fuerza de aceleración.

Aunque existen varios tipos de tecnologías y diseños, se destacará uno en concreto:

- Acelerómetros Piezoeléctricos

Estos dispositivos electromecánicos pueden detectar las fuerzas de aceleración, ya sea estática o dinámica. Las fuerzas estáticas incluyen la gravedad, mientras que las fuerzas dinámicas pueden incluir vibraciones y movimiento.

El acelerómetro piezoeléctrico por compresión es uno de los transductores más versátiles y comunes. Este se basa en que, cuando se comprime un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada.

Más específicamente, el elemento piezoeléctrico se encuentra comprimido por una masa, sujeta al otro lado por un muelle, y todo el conjunto situado dentro de una caja metálica. Cuando el conjunto es sometido a vibración, el disco piezoeléctrico se ve sometido a una fuerza variable, proporcional a la aceleración de la masa. Debido al característico efecto piezoeléctrico, se desarrolla un potencial variable que será proporcional a la aceleración (Figura 2.35 (a)).

Este dispositivo junto con los circuitos eléctricos asociados, se puede usar para la medida de vibración, velocidad y desplazamiento además de la determinación de formas de onda y frecuencia. Una de las ventajas principales de este tipo de transductor, es que se puede hacer tan pequeño que su influencia sea despreciable sobre el dispositivo a medir (Figura 2.35 (b)).

A parte de la implementación para la medición de la aceleración en una sola dirección, existen otros diseños que permiten detecciones en dos o tres dimensiones; esto es, en tres direcciones del espacio ortonormal; como es el caso de los acelerómetros triaxiales (Figura 2.35 (c)).

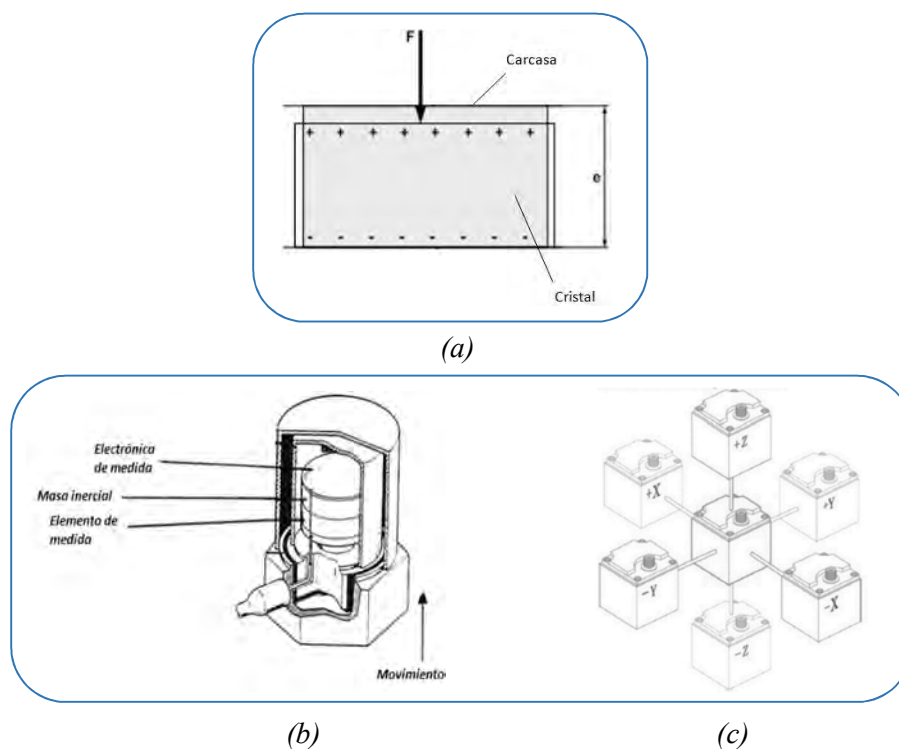


Figura 2.35: Acelerómetro piezoeléctrico: (a) Diagrama de un acelerómetro piezoeléctrico, (b) Construcción interna y (c) Medida en diferentes ejes de un acelerómetro triaxial.

Se debe señalar que, basándose en este mismo principio, el objeto a medir también puede ser la propia fuerza aplicada al transductor. Es por ello que estos acelerómetros específicos, diseñados para lecturas a mayor frecuencia, reciben el nombre de sensores de impacto.

2.4 Actuadores y electrónica de control para la caracterización y evaluación de los actuadores con flexibilidad articular

El control y los actuadores que fueron integrados en el banco, constituyen la parte fundamental para el cambio de flexibilidad y posición de los dispositivos AVASTT y MMJS. El diseño de estos dispositivos compactos y eficientes que integran su propia electrónica les confiere un comportamiento de regulación excelente y los convierte así en dispositivos ideales para su aplicación en el ámbito de la robótica, además de ofrecer una gran facilidad a la hora de ser configurados. Todo ello, convergió en la elección de estos dispositivos que a continuación se detallan, para formar el núcleo electro-mecánico del banco de ensayos.

2.4.1 Motor principal

Este motor CC (Corriente Continua) de doscientos vatios del fabricante Maxon Motor, será el encargado del movimiento de todo el brazo flexible. Éste tipo de motores se caracteriza por la facilidad de control en cualquier posición y la ausencia de no-linealidades en el comportamiento. La composición interna puede ser observada en la figura 2.36.

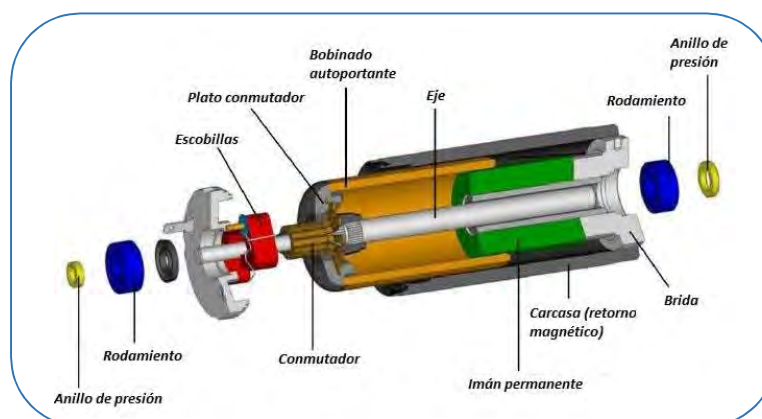


Figura 2.36: Composición mecánica del motor.

En esta imagen se reconocen los siguientes tres subconjuntos:

- El estator consistente en un imán permanente en el centro (verde), la carcasa (sirve como el retorno magnético) y la brida de montaje.

- El rotor con bobinado y colector. El devanado está conectado al eje por la llamada placa de colector. En este ejemplo, el eje está soportado en el estator por rodamientos de bolas. La forma del rotor recuerda a una campana; es por eso que a veces se denomina "forma de campana". El bobinado se mueve en el espacio de aire entre el imán y la carcasa.
- El sistema con escobillas de grafito (rojo) con las conexiones eléctricas del motor.

Otra de sus grandes cualidades es la fabricación sin núcleo de hierro, lo que implica que no se produzcan pérdidas ni efectos de saturación (Figura 2.37).

En un diseño convencional, el núcleo de hierro cambiaría permanentemente su magnetización. Esto consume energía debido a que el ciclo de histéresis magnética se debe ejecutar en cada rotación del eje. Además, estas variaciones del flujo inducen corrientes parásitas en el núcleo de hierro, generando pérdidas de potencia que crecen con el cuadrado de la velocidad del motor.

Por el contrario, en un motor sin núcleo de hierro, la magnetización es permanente y constante (las influencias del campo magnético del devanado se puede despreciar en una primera aproximación). Por lo tanto no hay pérdidas en el hierro.

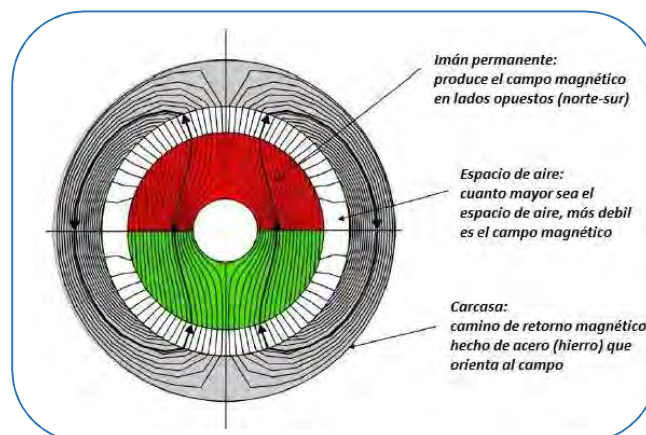


Figura 2.37: Funcionamiento del núcleo del motor.

Como resultado, las pérdidas de potencia son menores y la eficiencia es mayor. Además, al utilizar imanes permanentes más fuertes que no están limitados por el flujo magnético máximo en el núcleo de hierro, implica mejoras en la tecnología de imanes, que conducen a motores más fuertes y resistentes.

Gracias a esta magnetización constante, este motor es capaz de mantener una alta eficiencia de hasta más del noventa por ciento. Además, incluso en las más altas corrientes, el par producido es proporcional a la corriente del motor (Figura 2.38).



Figura 2.38: Esquema de generación de fuerza en el motor.

Esta integración tan compacta, era la interfaz perfecta para realizar los movimientos deseados del brazo.

2.4.2 Motor secundario

El motor secundario es el encargado de realizar el cambio de la rigidez para el caso del dispositivo AVASTT. Está constituido por un motor sesenta vatios de CC. Al igual que el motor principal, era muy adecuado para altas corrientes y corrientes de pico, motores grandes (>10 W) y aplicaciones *start-stop*. A semejanza del motor para el cambio de posición (principal), el motor secundario fue acoplado a una reductora planetaria y a un encoder para el correcto control de posicionamiento intrínseco.

La reductora es requerida para producir una potencia mecánica de alto par, con una reducción de velocidad. Más concretamente, las reductoras planetarias son las más indicadas para realizar dicha transmisión de pares elevados (Figura 2.39). Además, disponen de un reducido tamaño y peso para las aplicaciones más exigentes.



Figura 2.39: Reductor planetario.

Algunas de sus características principales son:

- ❖ Pares de salida hasta 180 N/m.
- ❖ Relaciones de reducción desde 4:1 hasta 6285:1.
- ❖ Diámetro externo de 6 - 81 mm.
- ❖ Altas prestaciones en espacio reducido.
- ❖ Elevadas reducciones en poco espacio.
- ❖ Salida y entrada de ejes concéntrica.

Por otra parte, el sensor de posición intrínseco (encoder) se utiliza para el procesamiento interior en el sistema de control. El encoder transmite las señales de onda

cuadrada, cuyos pulsos se cuentan para un posicionamiento exacto o para determinar la velocidad de giro real. El desfase entre las señales de los canales A y B permite su comparación con el propósito de determinar el sentido de giro (Figura 2.40).

Este sistema de posicionamiento, también detecta los flancos de subida y de bajada de la señal, lo que implica una precisión cuatro veces más alta. En este caso se habla de “*quadcounts*”.

Asimismo, el canal *Index* (Canal I) puede ser usado como punto de referencia para determinar con precisión el ángulo de rotación recorrido.



Figura 2.40: Sensor de posición intrínseco.

Alguna de las características más destacadas son:

- ❖ Alto número de pulsos.
- ❖ Posibilidad de canal *index* y *Line Driver* (señal complementaria).
- ❖ Precisión muy elevada.

Incorporando todos estos elementos bajo un mismo aparato, hacía que este motor fuera la elección ideal para realizar los cambios deseados en la rigidez del actuador variable (Figura 2.41).

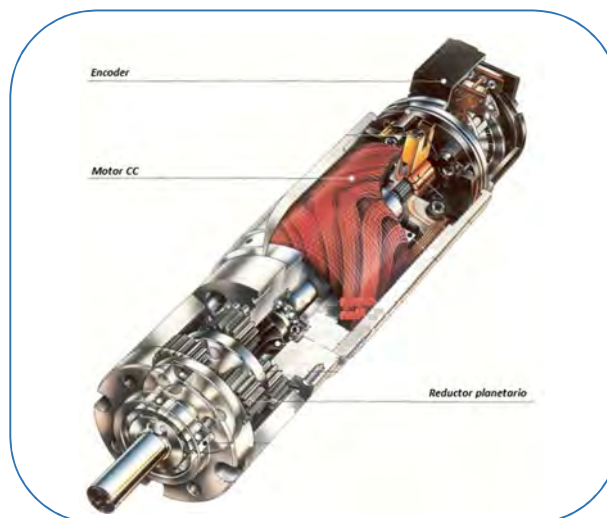


Figura 2.41: Esquema completo de todos los elementos que componen el motor principal y secundario.

2.4.3 Controlador

Para poder interactuar con los motores instalados en el actuador AVASST y en el MMJS, se instalaron dos sistemas de “*Easy Position System*” (EPOS) de la compañía

Maxon Motor. Estos sistemas EPOS se basan en un controlador digital de posicionamiento con estructura modular. Resulta adecuado para motores de CC de imán permanente, con y sin escobillas, con encoder incremental en un rango de potencia desde uno hasta setecientos vatios. Cuentan además con un gran número de modos operativos, así como diferentes interfaces para su control, permitiendo así un uso flexible en los más diversos sistemas de motores en la tecnología de la automatización y en la mecatrónica.

La principal función de estos controladores es mantener una velocidad predeterminada tan estable como sea posible, independientemente de las fluctuaciones en la carga. Los circuitos electrónicos comparan constantemente la velocidad de control (deseada) con la velocidad actual (real). El controlador detecta esta diferencia y la compensa actuando sobre la etapa de potencia. Esto es, un control de velocidad de bucle cerrado (Figura 2.42).

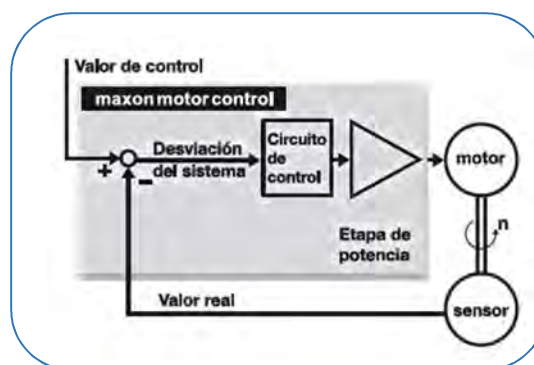


Figura 2.42: Esquema de circuito de control.

De la misma manera que el control de velocidad, el control de posición asegura que la posición medida coincida con la posición deseada, gracias a la información que se recibe del encoder digital (Figura 2.43).

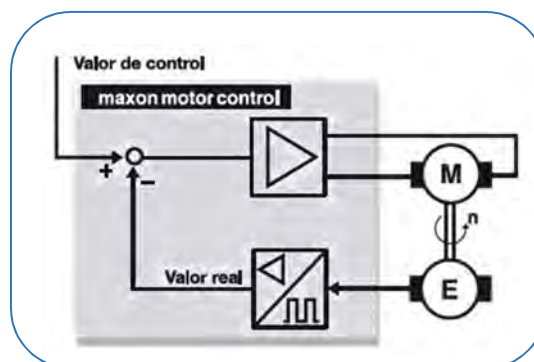


Figura 2.43: Esquema de control por encoder.

Por último, el control de corriente proporciona al motor la intensidad correspondiente a una señal dada. Consecuentemente el par del motor cambia siguiendo el valor de esta señal de control. El control de corriente mejora las prestaciones de un sistema superior de control de posición o velocidad (Figura 2.44).

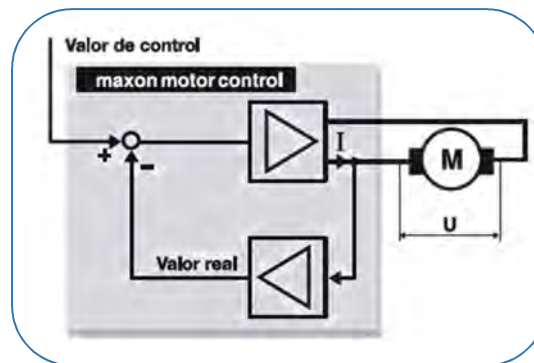


Figura 2.44: Esquema de control de corriente.

Además, este dispositivo puede estar comunicado y controlado mediante red CANopen, USB y RS232, así como otras interfaces de comunicación (Figura 2.45). Como se ha mencionado, dispone de una gran variedad de modos de funcionamiento basados en la posición, la velocidad o la corriente; así como modos “paso a paso” para el movimiento incremental controlando el eje del motor o “*master encoder mode*” para la aplicación de la unidad como engranaje electrónico.

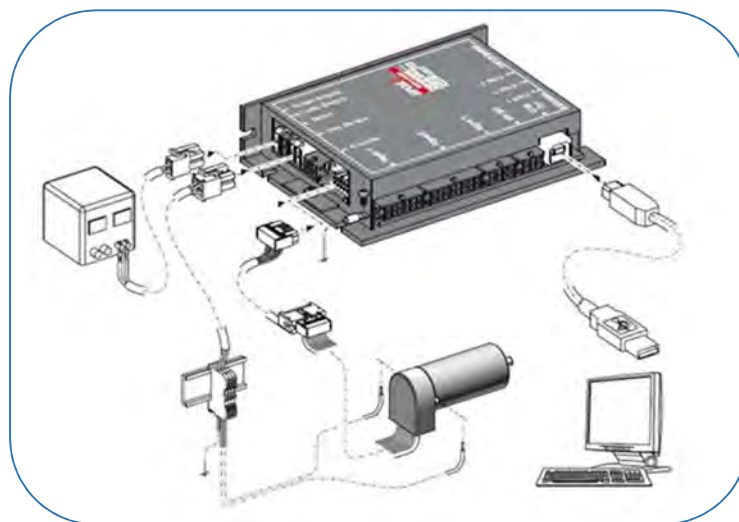


Figura 2.45: Controlador EPOS, así como conexión con diferentes dispositivos.

Cuenta con funcionalidades destacadas en el control de movimiento, por ejemplo, ofreciendo la posibilidad de bucle dual en posición y reguladores de velocidad. En “*interpolated position mode*” (IPM), el regulador de posición es capaz de seguir de forma sincrónica un camino trazado por puntos de apoyo; con buen dinamismo y gran precisión. Durante el arranque, la corriente, los controles de velocidad o de posición se pueden establecer muy eficientemente a través de una identificación de los parámetros principales del sistema denominado “*tuning mode*”. Todo este sistema está integrado en el *software* del fabricante (*EPOS Studio*), aunque en este trabajo, se sustituirá dicho *software* por el control mediante un nuevo HMI basado en LabVIEW.



3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

3.1 Introducción

A lo largo de este capítulo, se mostrará al lector las diferentes partes que conforman el banco de ensayos. Con ello, se podrá formar una imagen nítida y general del conjunto de componentes que interactúan entre sí para lograr el objetivo de controlar y adquirir datos de los actuadores AVASTT y MMJS, así como de los ensayos realizados.

Como ya se ha introducido previamente, AVASTT requiere de dos motores que le proporcionarán capacidad para variar su posición y rigidez articular. En cambio, MMJS ha sido implementado mediante un solo motor que le permitirá moverse, teniendo en el cambio de su rigidez, un nuevo método pasivo basado en la pre-compresión de muelles que permite la eliminación del segundo motor.

Ambos actuadores, fueron instrumentados mediante un diverso conjunto de sensores diseñados para la medida de posición, aceleración, velocidad, corriente y fuerza. Además, se dispondrá de dos estaciones de computación encargadas de realizar el enlace entre el banco y el operador. Dichas estaciones, permitirán monitorizar y controlar la bancada en todo momento durante las situaciones de prueba, permitiendo una forma de comprobación rigurosa, transparente y repetible de lo que está sucediendo.

3.2 Descripción general del sistema

En la figura 3.1 se puede observar el banco de ensayos utilizado.

Éste cuenta con una zona diseñada para el montaje y movimiento del actuador flexible con rigidez variable que hará las veces de brazo robot (zona 1) y, una segunda zona (zona 2) destinada al impacto en la cabeza *dummy* de 1 G.D.L (grados de libertad). Se habilitó un espacio situado en la parte más baja de la bancada (zona 3), que estará destinada a los elementos electrónicos de instrumentación y control. Por último, no debe olvidarse el espacio destinado a la monitorización, control y operación del banco por parte del operador (zona 4). Esta zona está apartada de la propia bancada para obtener mayor seguridad durante los ensayos realizados.

Gracias a esta disposición, todo el sistema queda compactado en una zona de *test* y otra de control, siempre interconectadas y separadas.

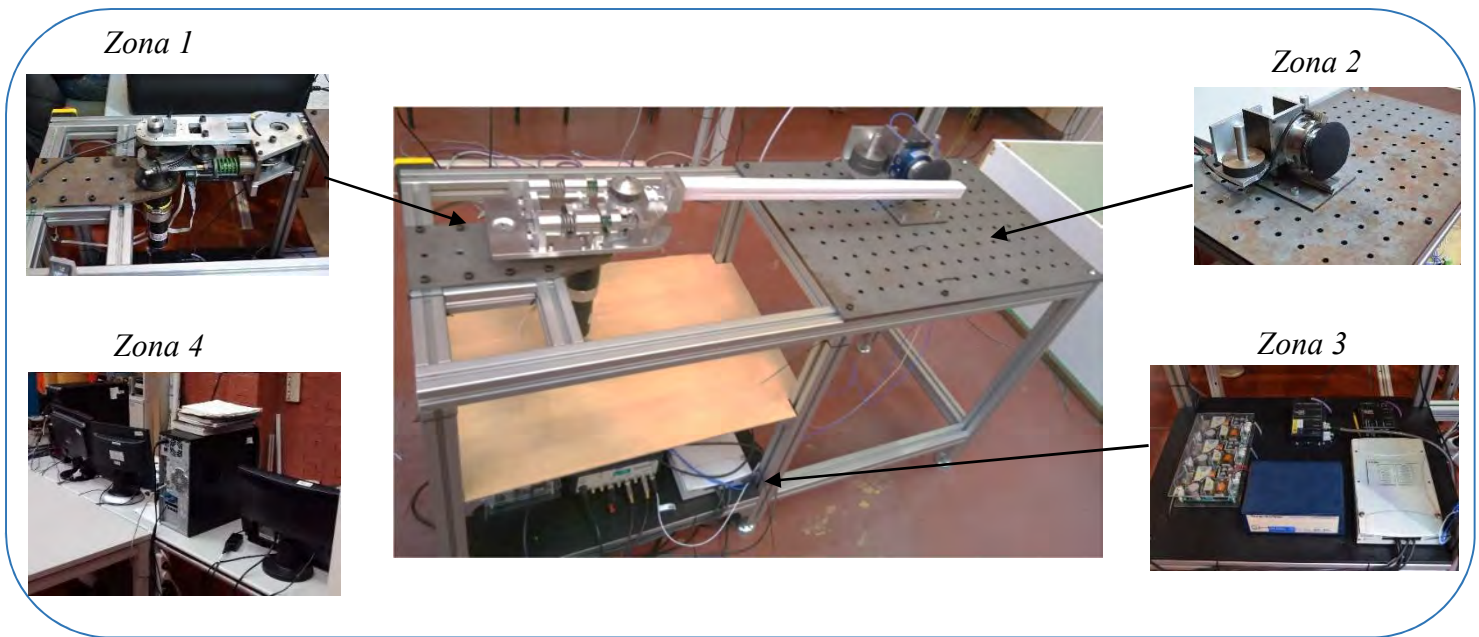


Figura 3.1: Estructura general del banco de ensayos: (Zona 1) Actuador, (Zona 2) Mesa de ensayo y dummy, (Zona 3) Mesa de instrumentación y (Zona 4) Estaciones de control.

El importante tamaño del banco que se ilustra en la figura anterior, nace precisamente de la necesidad de experimentar en este estudio, siendo imprescindible contar con un equipo capaz de adaptarse a diferentes configuraciones de ensayo; o dicho de otro modo, beneficiarse de una alta capacidad de manipulación y una amplia robustez en todos sus aspectos.

Estructura

La componente mecánica del banco se divide en dos partes diferenciadas e independientes:

- El brazo robótico flexible: que reproduce los parámetros característicos básicos de un robot manipulador (zona 1).
- La cabeza *dummy*: con valores de inercia, rigidez y amortiguamiento similares a los de una cabeza humana (zona 2).

La instrumentación montada en la mesa de impactos permitirá medir la fuerza de contacto y la aceleración del sistema cabeza-cuello cuando colisiona con el extremo del robot. Con este objetivo, se dispondrá de los siguientes elementos de medida:

- Tres acelerómetros: dos de ellos para medida lineal, destinados a la adquisición de la aceleración en la zona de impacto. Se dispondrá de un tercer acelerómetro triaxial que servirá de complemento dependiendo de la configuración del

ensayo y del interés concreto en una medida particular, pudiendo ser utilizado como refuerzo en las mediciones.

- Cuatro encoders: de los cuales, dos de ellos forman parte intrínseca del sistema de motores para el control de posición. Los otros dos restantes, serán utilizados para la medida de posición relativa en diferentes zonas del banco.
- Sensor de fuerza/par: capaz de realizar mediciones simultáneas en los ejes X, Y Z.

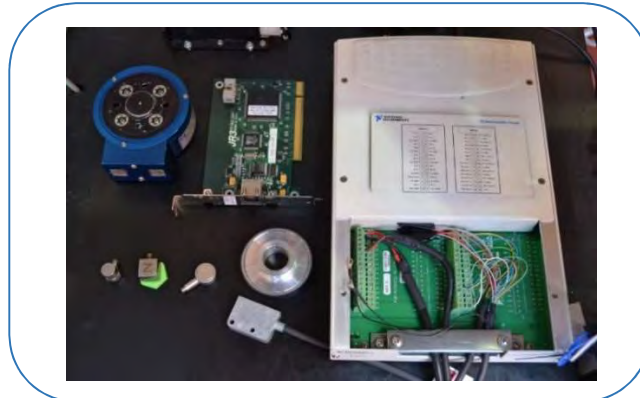


Figura 3.2: Instrumentación utilizada para los ensayos de impacto.

Por último, es necesario realizar un control lógico de toda la parte mecánica para conseguir los movimientos y niveles de rigidez deseados en el actuador, así como recopilar y tratar los datos procedentes de la instrumentación (Figura 3.2). Para ello, se cuenta con los siguientes equipos:

- Dos controladores electrónicos de motores; uno destinado al control del motor principal del actuador, y el segundo centrado en el motor secundario de cambio de rigidez (Figura 3.3).
- Sistema de adquisición de datos; necesario para recoger todos los datos procedentes de los diferentes sensores, y poder integrarlos/tratarlos mediante el HMI implementado como control de la estación.



Figura 3.3: Controladores electrónicos y sistema de adquisición de datos.

Diagrama de la configuración de hardware para el control de un motor de inducción. El sistema incluye un DAQ conectado a un Maestro y un Esclavo. El Maestro se comunica con el Esclavo a través de una red de comunicación. El Esclavo está conectado a un motor de inducción a través de un convertidor EPOS2 50/5. El convertidor EPOS2 50/5 está alimentado por una fuente de alimentación de 24 V. El convertidor EPOS2 70/10 está conectado al convertidor EPOS2 50/5 a través de una interfaz CANOpen. El convertidor EPOS2 70/10 está conectado al DAQ a través de una interfaz USB. El DAQ está conectado a un acelerómetro y un encoder. El motor de inducción está conectado a un encoder a través de una interfaz 1:30.

En dicha imagen, se pueden destacar dos zonas principales:

- ### 3.2.1 La cabeza dummy

La herramienta más utilizada durante los ensayos de impacto son los “*crash test dummy*”. Estos dispositivos replican las características antropométricas del ser humano, con el fin de simular la dinámica de colisión bajo diferentes situaciones. Debido al alto coste de los *dummy* comerciales, en este estudio se optó por el diseño de un sistema

mecánico simplificado, que emula la respuesta dinámica producto de la eventual colisión de un eslabón robótico contra la zona frontal u occipital de la cabeza humana.

En la figura 3.5 (a) se muestra un diagrama de cuerpo libre del sistema mecánico diseñado. Se trata de una simplificación traslacional de 1 GDL de un *dummy head*, en la cual la inercia de la cabeza es representada a través de una masa m_h , y la rigidez aportada por el cuello es incluida a través de un resorte de rigidez k_n . Este conjunto surge tras el análisis de distintos modelos del sistema cabeza-cuello que han sido utilizados en otros trabajos [(Haddadin, et al., 2007); (Hyun, et al., 2010)].

Un modelo de estas características permite una fácil implementación, se instala rápidamente sobre el banco de ensayo ya dispuesto, y permite un fácil ajuste de sus parámetros debido a la simplicidad con la que se representa la rigidez del cuello y la masa de la cabeza. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este modelo traslacional del conjunto cuello-cabeza, considera únicamente el impacto sobre la zona frontal u occipital de la cabeza, junto al consecuente movimiento de extensión o flexión del cuello.

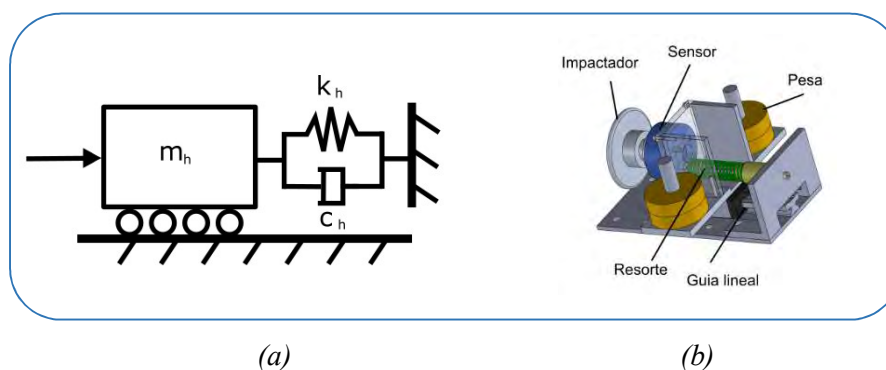


Figura 3.5: *Dummy traslacional de 1 G.D.L.: (a) Diagrama de cuerpo libre y (b) Modelo CAD.*

La figura 3.5 (b) muestra el modelo en CAD del *dummy* implementado. Consiste en un sistema de guía-patín sobre el cual se monta un chasis, que sostiene a las pesas necesarias para completar la masa m_h y que esta acoplado al resorte de rigidez k_n . Además, en el mismo se ha incluido un sensor de fuerza/par de seis ejes, ubicado entre el chasis y el impactador, para así poder medir todas las componentes de la fuerza de colisión f_c .

Los valores de los parámetros característicos del sistema (k_n , C_n y f_c), son elegidos en concordancia con los datos disponibles de experimentos realizados a voluntarios [(Bosio & Bowman, 1985); (Deng, et al., 2003); (Gong, et al., 2008); (Melvin, et al., 1985)], y los datos encontrados en otros sistemas con *dummy* de 1 G.D.L, pero de desplazamiento rotacional (Haddadin, et al., 2008). La tabla I, muestra los valores seleccionados para el *dummy* fabricado, y el valor de estos parámetros en un modelo rotacional equivalente, en el cual el punto de aplicación de la fuerza está ubicado a 0,15 m del eje de rotación del mismo.

Tabla I: *Parámetros característicos del dummy de 1 G.D.L.*

Propiedad	Modelo traslacional	Modelo rotacional
Masa	3.7 Kg	---
Inercia	---	0.06 Kg
Rigidez	4600 N/m	100 N/m

Los datos del modelo rotacional se aportan como referencia comparativa a otros modelos rotacionales que son más comunes en la literatura (Wismans & Spenny, 1984). Sin embargo, el modelo traslacional aquí implementado permitió obtener valores de fuerza de impacto y aceleración tangencial de la cabeza, con resultados muy parecidos a los que podría aportar un modelo rotacional, puesto que tanto la velocidad angular como la aceleración centrípeta de la cabeza durante un impacto puede considerarse despreciable en relación a la velocidad y aceleración tangencial, que es la que se aprecia en un modelo traslacional como el planteado. En la figura 3.6 se muestra el modelo con el sensor integrado, así como su instalación completa en la práctica.

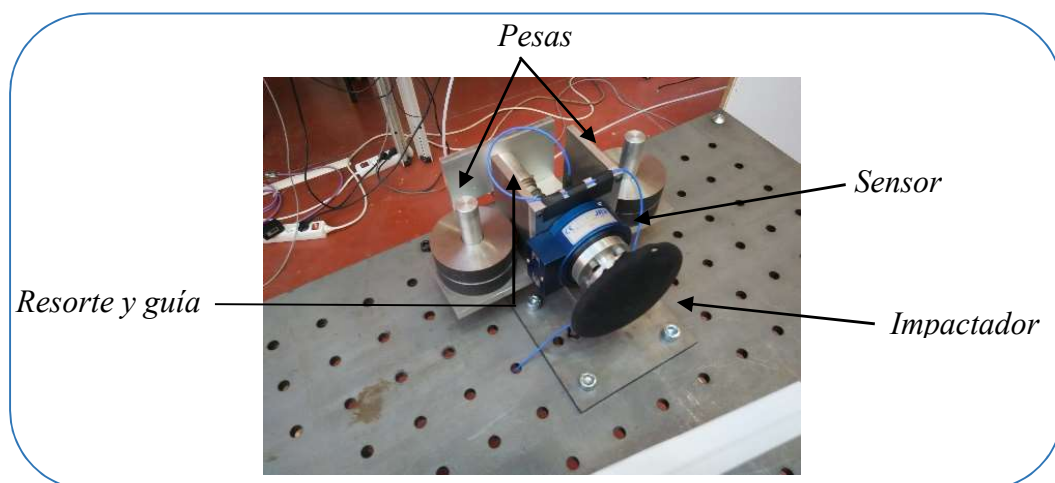


Figura 3.6: *Dummy real en la mesa de impactos.*

3.2.2 Actuador de rigidez variable AVASTT

El mecanismo AVASTT presenta una configuración serie, donde un motor principal controla la posición de equilibrio del eslabón de salida y un segundo motor modifica la rigidez de la articulación.

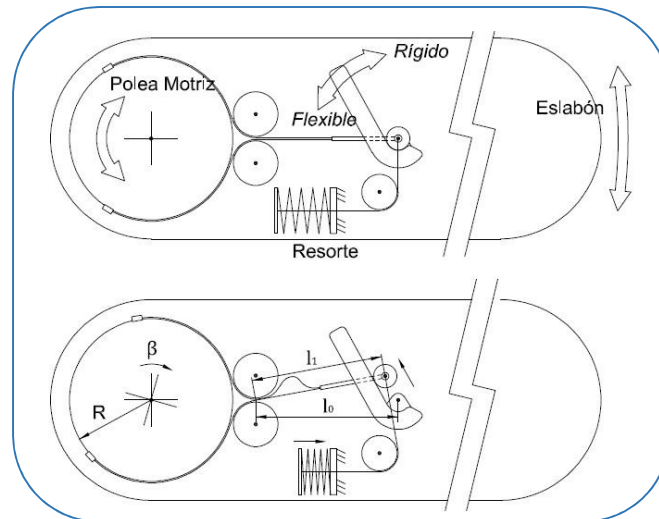


Figura 3.7: Diseño conceptual del actuador de rigidez variable. En posición de equilibrio (arriba) y en posición desviada bajo una carga exterior (abajo).

La figura 3.7 ilustra el diseño de AVASTT. Caracteriza al mecanismo el uso de un sistema basado en la transmisión cable-polea. El eje de salida del motor principal actúa sobre la polea motriz en la que van fijados, por medio de dos tensores, sendos cables; los cuales, tras pasar por las poleas guías se fijan a una barra. Esta barra está articulada en su otro extremo a un rodillo que puede rodar sobre una palanca. Un tercer cable fijado al eje del rodillo es redirigido por medio de otra polea guía y fijado al extremo libre de un resorte. Cuando el motor principal ejerce par, se produce la compresión del resorte y por tanto una desviación angular entre la polea motriz y el eslabón de salida. El valor de esta desviación indica el grado de flexibilidad o rigidez mecánica y viene dado por el ángulo de inclinación de la palanca, donde un segundo motor es el encargado de modificar dicha posición de palanca. Cuando la palanca se coloca en posición vertical (según la figura 3.7) el actuador es idealmente rígido, no pudiendo haber desviación entre la polea motriz y la posición del brazo. Si la palanca se posiciona horizontalmente, el mecanismo adopta su configuración de máxima flexibilidad. La figura 3.7 muestra dos situaciones del actuador para una misma posición intermedia de palanca (rigidez intermedia): cuando el brazo está en su posición de equilibrio, y cuando el motor principal ejerce par y se produce una desviación angular entre la polea motriz y la posición del eslabón de salida.

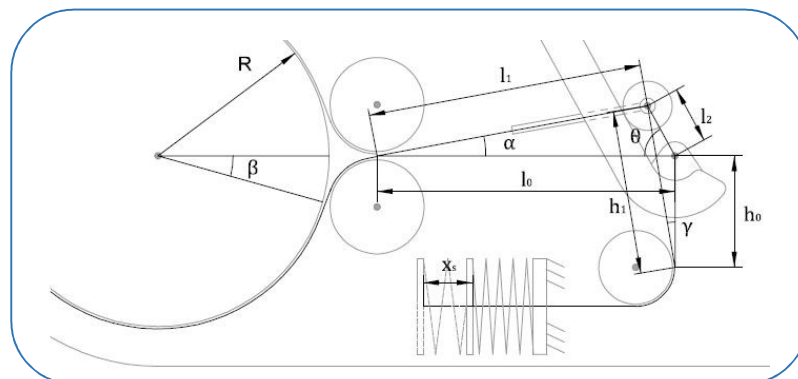


Figura 3.8: Esquema de funcionamiento del actuador de rigidez variable.

Para caracterizar el actuador es necesario conocer la relación entre el T par ejercido por el motor principal y la desviación angular β producida. La figura 3.8 muestra un esquema con los parámetros necesarios para describir el par T y la rigidez de la articulación K en función de la desviación angular β .

Cuando la polea motriz de radio R se desvía un ángulo β respecto de la posición de equilibrio, se produce un acortamiento de la distancia inicial del cable en la posición de equilibrio que, despreciando la curvatura del cable sobre la polea guía, pasa hasta un valor l_1 en la posición deformada según

$$l_1 = l_0 - \beta \cdot R \quad (1)$$

En esta posición el rodillo habrá rodado sobre la palanca una distancia l_2 , que dependerá de la posición angular θ de la palanca. Resolviendo el triángulo formado por los lados l_0, l_1 , y l_2 , para l_2 y el ángulo α formado entre l_0 y l_1 ,

$$l_2 = l_0 \cdot \cos \theta - \sqrt{l_1^2 - l_0^2 \cdot \sin^2 \theta} \quad (2)$$

$$\sin \alpha = l_2 \cdot \frac{\sin \theta}{l_1} \quad (3)$$

Al desplazarse el rodillo, el resorte sufrirá una compresión x_s dada por,

$$x_s = h_1 - h_0 \quad (4)$$

donde h_0 es la distancia inicial del cable que une el rodillo con el resorte y h_1 la distancia en la posición deformada. Siendo

$$h_1 = \sqrt{(l_1 \cdot \sin \alpha + h_0)^2 + \left(\frac{l_1 \cdot \sin \alpha}{\tan \theta}\right)^2} \quad (5)$$

Sustituyendo convenientemente (1), (2) y (3) en (5), y posteriormente (5) en (4), esta última expresión es la relación geométrica entre la compresión del resorte x_s y la desviación angular β . Partiendo ahora de la fuerza ejercida por el resorte se calcula el par T ejercido por el motor principal. La tensión del cable del resorte será el producto de la rigidez del resorte por la compresión del mismo,

$$F_s = K_s \cdot x_s \quad (6)$$

Sobre el rodillo actuarán esta fuerza F_s , una fuerza normal a la superficie de contacto rodillo-palanca, y la fuerza ejercida por el cable de la polea motriz F_c . Resolviendo el diagrama de fuerzas se tiene que

$$F_c = F_s \frac{\sin(\theta + \gamma)}{\cos(\theta + \alpha)} \quad (7)$$

siendo

$$\gamma = \arctan\left(\frac{l_3 \cdot \cos \theta}{h_0 + h_r}\right) \quad (8)$$

Finalmente, el par T ejercido por el actuador será

$$T = F_c \cdot R = T(R, l_0, h_0, K_s, \theta, \beta) \quad (9)$$

y derivando (9) en función de β se obtiene la rigidez torsional del actuador

$$K = \frac{dT}{d\beta} = K(R, l_0, h_0, K_s, \theta, \beta) \quad (10)$$

Las ecuaciones (9) y (10) vienen expresadas en función de varios parámetros: las dimensiones del mecanismo R, l_0, h_0 , la rigidez lineal del resorte K_s , el ángulo de palanca θ y la desviación angular β . Para un actuador dado, los cuatro primeros parámetros serán fijos, y la posición de palanca θ será controlada por el motor secundario.

En la figura 3.9 se pueden observar diferentes modelos CAD del actuador de rigidez variable AVASTT.

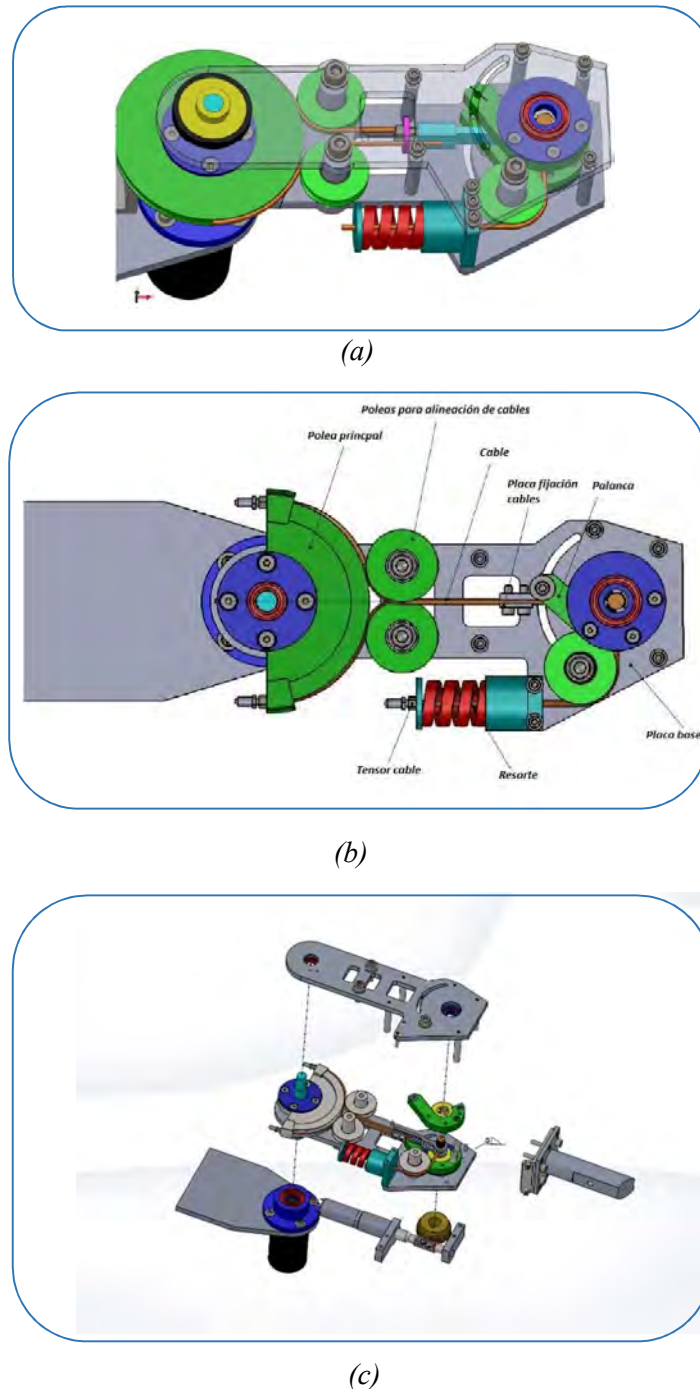


Figura 3.9: Modelos CAD de AVASTT: (a) Modelo del actuador completo, (b) Disposición de los distintos elementos del actuador y (c) Modelo explosionado del actuador.

3.2.3 Embrague elástico MMJS

El diseño del dispositivo MMJS se basa en un conjunto de resortes lineales, precargados e instalados de tal forma que adquieran las particularidades de los actuadores elásticos serie y restrinjan la fuerza máxima del sistema. Éste es un actuador pasivo porque no dispone de un segundo elemento de accionamiento en la misma articulación (al contrario que AVASST). Sin embargo, es un mecanismo de rigidez variable gracias a las tres zonas de operación que es capaz de adoptar, en la que cada zona se caracteriza por un valor de rigidez diferente, en función del par elástico que se genera en la articulación.

La figura 3.10 (a) muestra el mecanismo capaz de transformar el movimiento articular en movimiento lineal. Está compuesto por una manivela central, un rodillo, un pasador y un pistón. La manivela puede rotar alrededor del eje de rotación O , generando un ángulo de deflexión β con respecto al eje x . La corredera interior permite que el rodillo se deslice. Además, el rodillo hace de apoyo al pistón, que tiene su movimiento restringido al eje y .

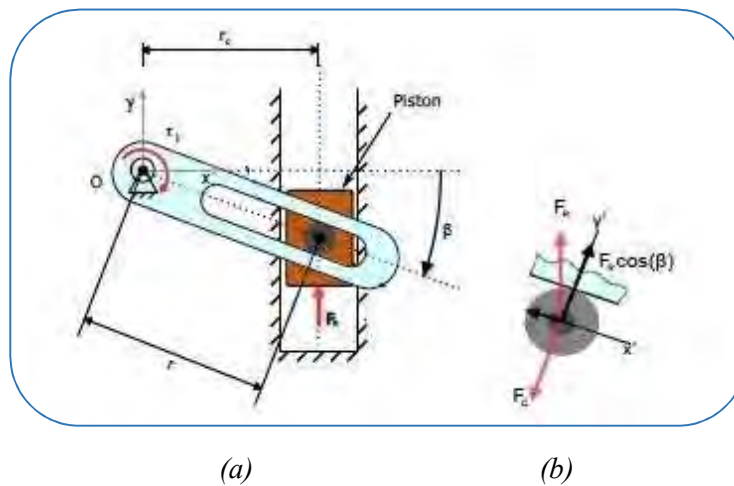


Figura 3.10: (a) Mecanismo de doble corredera y (b) Fuerzas en el pin.

Cuando se aplica una fuerza de par τ_i , el contacto entre la corredera interior y el rodillo producirá una fuerza F_c que se transmite al pistón por el pasador. Si se busca el equilibrio estático del sistema, es necesario aplicar una fuerza F_R adecuada sobre el pistón, en la dirección del eje y positivo, como se muestra en la figura 3.10 (a). La relación entre la fuerza F_R y la de par τ_i se obtiene a través del balance de fuerzas que actúan sobre el pasador (Figura 3.10 (b)). Teniendo en cuenta que la distancia entre el eje giratorio y el pasador r , varía de acuerdo con la $r = r_0 \cdot \sec \beta$, se puede demostrar que:

$$\frac{\tau_i}{F_R} = r_0$$

Donde existe una relación de transmisión independiente del ángulo de desviación, que es igual a la distancia mínima de separación del eje de rotación desde el centro de la segunda r_0 .

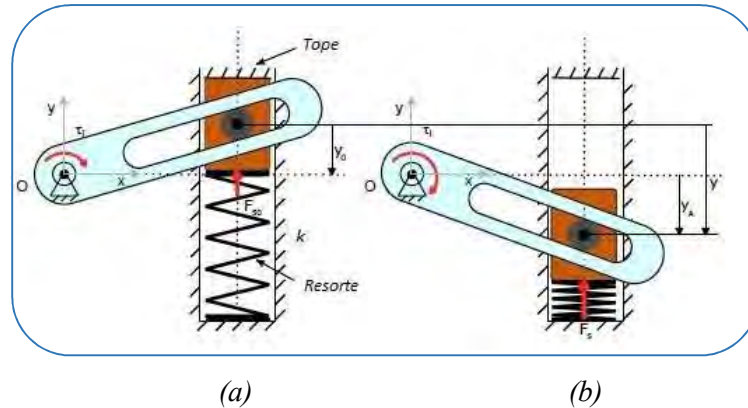


Figura 3.11: Mecanismo con flexibilidad: (a) Estado inicial de equilibrio y (b) configuración general.

Para incorporar un comportamiento elástico en el sistema, un resorte está conectado entre el pistón y el extremo inferior de la segunda corredera (Figura 3.11 (a)). Además, se añade un tope en el extremo superior, que limita el movimiento del pistón y mantiene una compresión mínima.

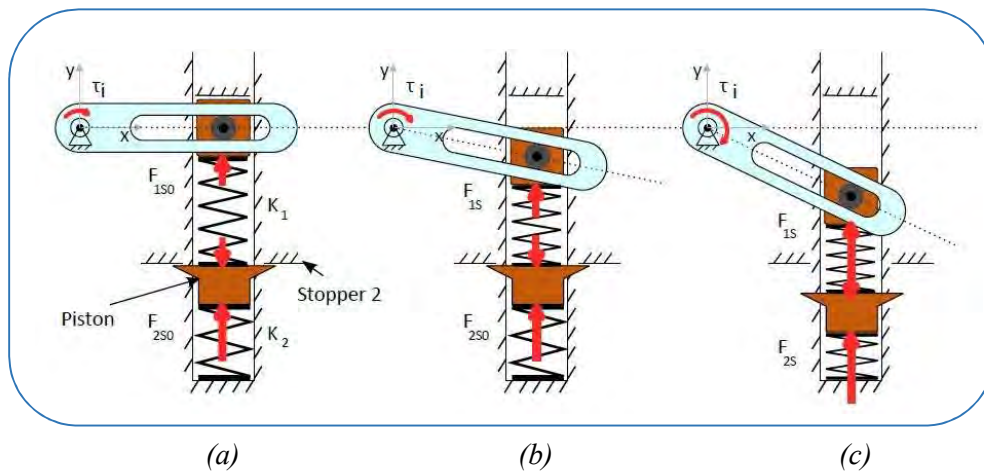


Figura 3.12: Mecanismo de doble muelle: (a) equilibrio inicial (b) estado de flexibilidad por una primera fuerza (c) estado de flexibilidad por una segunda fuerza.

Basado en el principio de funcionamiento de doble resorte, la articulación robótica ha sido diseñada con el propósito de disponer de una múltiple rigidez en la articulación. Dicha articulación está formada por una placa de base, una leva, seguidores, tres soportes principales, muelles principales y secundarios, topes, una guía de carriles y dos carros, como se muestra la figura 3.13. La leva, tiene la capacidad de girar alrededor del eje de rotación fijo en la placa de base. El contorno de la leva empuja a uno de los seguidores

dependiendo de su dirección de rotación. Ambos seguidores se fijan a los primeros soportes, que pueden empujar al sistema de muelles.

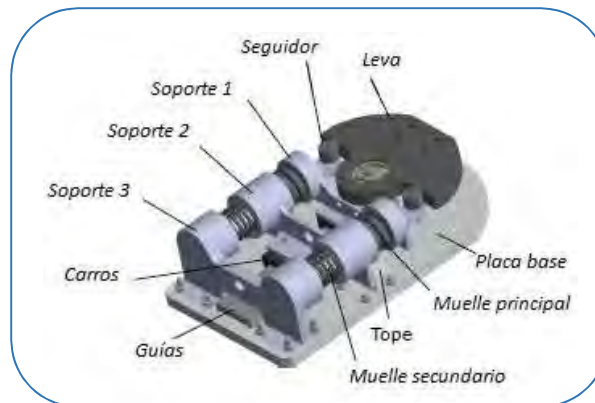


Figura 3.13: Prototipo CAD de MMJS.

La corredera de la figura 3.12, que permitió a los dos pistones poder deslizarse sobre el mismo eje, se ha implementado a través de unos carriles guía y dos carros (véase el gráfico 3.13). El carro más cercano al eje de giro de la leva se apoya sobre el primer soporte, y su función es transmitir la fuerza aplicada por la leva al conjunto de muelles de mayor rigidez. El segundo carro apoya al segundo soporte, y su objetivo será trasladar la fuerza de la mayor rigidez de los muelles superiores a los muelles de menor rigidez inferiores. Las distancia existente entre los topes y el tamaño de los muelles seleccionados determinan la precarga existente tanto en los resortes rígidos (superiores) como en los flexibles (inferiores).

Si se aplica una carga externa tal como se muestra en la figura 3.14, se genera un ángulo de desviación que produce el deslizamiento de los soportes 1 y 2 en la dirección de la guía.

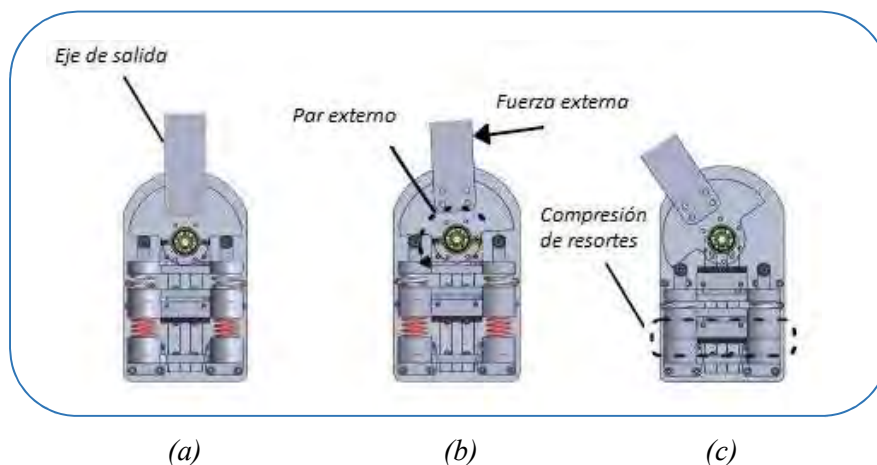


Figura 3.14: (a) Posición inicial, (b) Aplicación de una pequeña fuerza externa que produce la compresión de los resortes superiores y una $\beta < \beta_{th}$, y (c) Aplicación de una fuerza grande que produce que los resortes superiores e inferiores del actuador sean comprimidos como se muestra en el interior del contorno de puntos ($\beta = \beta_{m\acute{a}x}$).

La deflexión máxima se producirá cuando los resortes de rigidez inferiores logren su máxima compresión, en este punto los resortes obtienen su longitud sólida.

Con todo ello, se logra una primera área de operación de alta rigidez diseñada para pares pequeños. Esto facilita el posicionamiento preciso, y su valor puede ser configurado a través de los muelles principales de precarga. Una segunda zona de operaciones de rigidez media-baja, se caracteriza por reducir el consumo de energía en los movimientos cíclicos.

La característica de poder cambiar la rigidez rápidamente de un valor a otro, se traduce finalmente en una reducción del tiempo de reacción antes de una posible colisión.

3.2.4 Instrumentación y monitorización

Una vez realizada una descripción previa en el capítulo 2 acerca de los principios de funcionamiento de los diferentes instrumentos electrónicos utilizados para la toma y monitorización de datos, a continuación se realiza una explicación específica de las características y equipos utilizados para el banco de ensayos.

3.2.4.1 Sensores intrínsecos

El diseño de los sistemas de motores usados, permiten obtener datos intrínsecos en tiempo real acerca de su funcionamiento. En ambos motores (principal para movimiento del brazo, secundario para cambio de rigidez) se pueden monitorizar tres datos fundamentales: posición, velocidad y corriente.

La posición será obtenida por la lectura del encoder acoplado (Figura 3.15), que en ambos casos tiene unas características que pueden ser observadas en la tabla II.

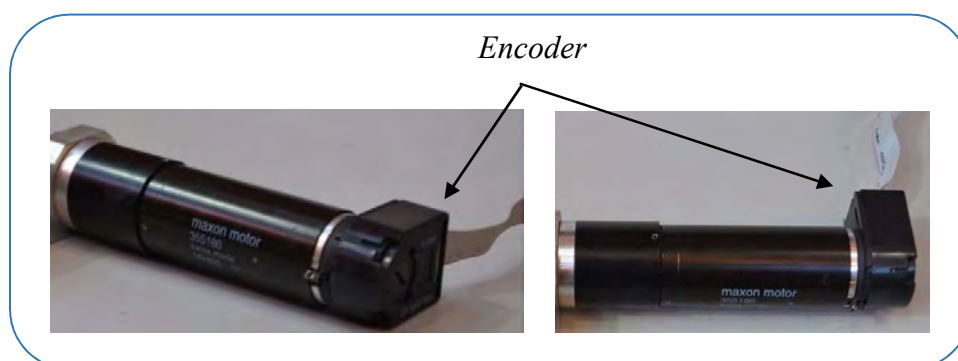


Figura 3.15: Encoder acoplado a los motores.

Tabla II: *Parámetros característicos de los encoders intrínsecos.*

Tipo	Valor
Número de pulsos por vuelta	500
Número de canales	3
Line Driver	DS26LS31
Máxima velocidad	12000 rpm
Diámetro del eje	3 mm
Datos Técnicos	Valor
Tensión de alimentación	5 V \pm 10 %
Máx. aceleración angular	250000 rad/s ²
Desfase	90°
Tiempo de flanco de subida	180 ns
Tiempo de flanco de bajada	40 ns

Por otro lado, la disposición geométrica de la bobina y el circuito magnético interno determinan detalladamente como se transforma la potencia eléctrica entrante (corriente, tensión) suministrados directamente por los controladores EPOS2, en potencia mecánica de salida (velocidad, par). De esta manera los datos de velocidad y corriente que son recogidos por el controlador, junto con los de posición recogidos por el encoder, son tratados y guardados por el sistema.

3.2.4.2 Sensores extrínsecos

Para poder realizar una correcta monitorización de todo el sistema, es necesario disponer de datos físicos asociados con la dinámica de impacto así como del comportamiento del brazo robótico en movimiento. Para ello, se cuenta con los siguientes sensores específicos:

- Acelerómetros:
 - 200B04 ICP PCB PIEZOTRONICS lineal con las siguientes características (Tabla III, Figura 3.16):

Tabla III: *Parámetros característicos del acelerómetro 200B04.*

Datos Técnicos	Valor
Sensibilidad	1124 mV/kN (\pm 15 %)
Rango de medida	\pm 4,45 kN
Máxima fuerza	22,24 kN
Límite de frecuencia	75 kHz
Voltaje de excitación	20 a 30 VDC
Corriente de excitación	2 a 20 mA
Tamaño	16,51 x 9,14 x 12,7 mm
Peso	14 g
Material	Acero inoxidable



Figura 3.16: *Acelerómetro 200B04.*

- J352C03 ICP PCB PIEZOTRONICS lineal con las siguientes características (Tabla IV, Figura 3.17):

Tabla IV: Parámetros característicos del acelerómetro J352C03.

Datos Técnicos	Valor
Sensibilidad	1,02 mV/(m/s ²) (± 10 %)
Rango de medida	± 4900 m/s ²
Rango de frecuencia	0,50 a 10000 Hz
Frecuencia resonancia	≥ 50 kHz
Resolución	0,005 m/s ²
Límite de sobrecarga	± 49000 m/s ²
Voltaje de excitación	18 a 30 VDC
Corriente de excitación	2 a 20 mA
Tamaño	11,20 x 15,70 mm
Peso	5,80 g
Material	Titanio



Figura 3.17: Acelerómetro J352C03.

- 356A15 ICP PCB PIEZOTRONICS triaxial con las siguientes características (Tabla V, Figura 3.18):

Tabla V: Parámetros característicos del acelerómetro 356A15.

Datos Técnicos	Valor
Sensibilidad	10,2 mV/(m/s ²)
Rango de medida	± 490 m/s ²
Rango de frecuencia	2 a 5000 Hz
Frecuencia resonancia	≥ 20 kHz
Resolución	0,002 m/s ²
Límite de sobrecarga	± 68600 m/s ²
Voltaje de excitación	20 a 30 VDC
Corriente de excitación	2 a 20 mA
Tamaño	14,00 x 20,30 x 14,00 mm
Peso	10,50 g
Material	Titanio



Figura 3.18: Acelerómetro 356A15.

➤ Encoders:

- 2x POSIROT PMIS4 ASM magnéticos con las siguientes características (Tablas VI y VII, Figura 3.19):

Tabla VI: *Parámetros característicos del sensor.*

Datos Técnicos	Valor
Salida	TTL/24 V
Voltaje de excitación	10 a 30 VDC
Corriente de excitación	50 a 300 mA
Periodo magnético	2 mm
Espacio entre sensor y rueda	0,10 a 0,80 mm
Tolerancia	± 1 mm
Linealidad	$\pm 0,1^\circ$
Repetitividad	± 1 dígito
Frecuencia de pulso	50 kHz, máx. 480 kHz
Peso	30 ± 5 g



Figura 3.19: *Encoder magnético (sensor y rueda).*

Tabla VII: *Parámetros característicos de la rueda.*

Factor de escalado del sensor	PMIR4-20-50		PMIR4-20-90	
	Periodo señal	R.P.M (a 480 kHz)	Periodo señal	R.P.M (a 480 kHz)
PMIS4-20-...				
250	12500	1843	22500	1024
500	25000	922	45000	512

➤ Fuerza/par:

- 85M35A3 JR3 INC. de 6 G.D.L. junto con su tarjeta procesadora de señal PCI 1593 y cable modular RJ-11 de 6 pines con las siguientes características (Tablas VIII y IX, Figuras 3.20 y 3.21):

Tabla VIII: *Parámetros característicos del sensor fuerza/par.*

Datos Técnicos	Valor
Exactitud nominal	1 % FS (Fondo de escala)
Linealidad	0,5 % FS dentro del rango, 0,10 % por debajo de $\frac{1}{4}$ de FS
Resolución	1/4000 FS
Repetitividad	Mejor que precisión absoluta
Diámetro nominal	85 mm
Espesor nominal	35 mm
Electrónica	Interna para una mayor inmunidad al ruido. Opción de salida digital para usar con una tarjeta de adquisición de datos PCI de JR3 inc. Opción de salida analógica, y una configuración electrónica de medio puente (Figura 3.20)



Figura 3.20: *Electrónica de sensor fuerza/par.*

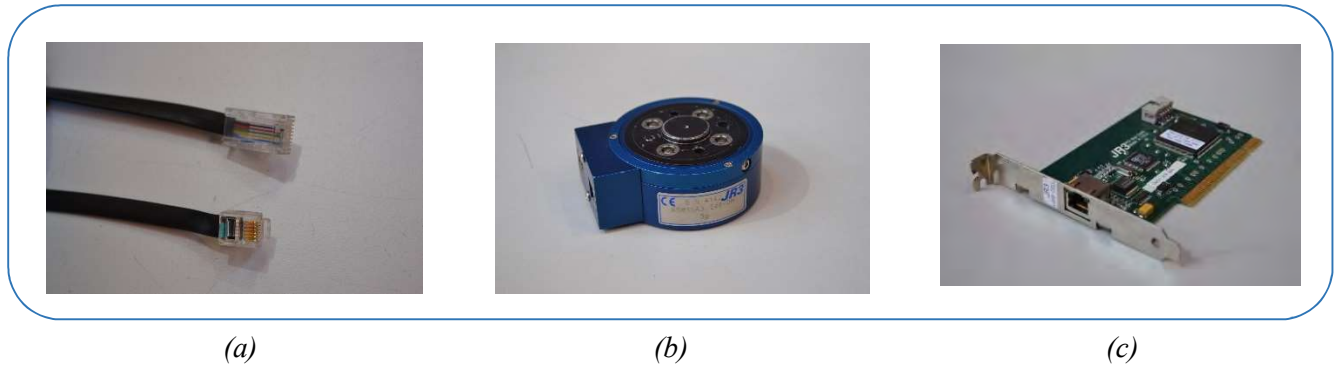


Figura 3.21: (a) Terminaciones de cable R-J11 y R-J45, (b) Sensor fuerza/par JR3 y (c) Tarjeta procesadora de señal.

Tabla IX: Fondos de escala del sensor fuerza/par.

Fuerza	Fondo de escala
F_z	63,00 N
F_y	63,00 N
F_x	252,00 N
M_x	0,27 N
M_y	0,27 N
M_z	0,27 N

3.2.4.3 Acondicionador de señales

La mayoría de las señales de los sensores y de los transductores del mundo real deben ser procesadas de una forma adecuada para la siguiente etapa de operación. Este proceso anticipado, designado como el acondicionamiento de señal, incluye funciones tales como amplificación de la señal, filtración, aislamiento eléctrico y multiplexación. Siendo más específicos, la señal puede ser, por ejemplo, demasiado tenue, siendo necesario amplificarla; podría contener interferencias que eliminar; ser no lineal y requerir su linealización; ser analógica y requerir su digitalización; ser digital y convertirla en analógica; ser un cambio en el valor de la resistencia y convertirla a un cambio en corriente; consistir en un cambio de voltaje y convertirla en un cambio de corriente de magnitud adecuada, etcétera.

Tanto los sensores piezoeléctricos de aceleración, como el sensor de fuerza/par, requieren un obligatorio acondicionamiento de la señal producida. Éstos además, suministran la tensión necesaria para el funcionamiento y permite que las señales recogidas puedan ser posteriormente tratadas por el sistema de adquisición de datos.

Para el caso concreto de los acelerómetros, se dispone de un acondicionador modelo 482C05 de PCB Piezotronics de cuatro canales de señal ICP (*Integrated Circuit Piezoelectric*) o acondicionador de señal IEPE (*Integrated Electronics Piezo Electric*) (Figura 3.22), diseñado para amplificar las señales procedentes de acelerómetros

piezoeléctricos. Además, proporciona una fuente de corriente ajustable para los sensores ICP y dispone de indicadores de condición de circuito abierto, corto y de sobrecarga.



Figura 3.22: (a) Parte frontal del acondicionador 482C05, (b) Conexiones traseras del acondicionador 482C05y (c) Placa electrónica interna del acondicionador 482C05.

En la figura 3.23, se puede observar que este acondicionador de señal, tiene *jumpers* seleccionables (x1, x10, y x100) como opciones de ganancia y una selección de rango de *overload*. Abriendo la cubierta, se permite el acceso la placa electrónica y sus componentes seleccionables.

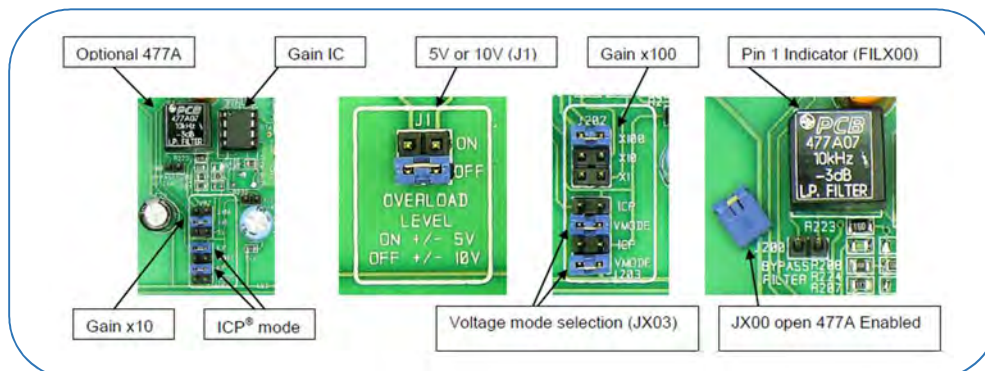


Figura 3.23: *Jumpers* seleccionables de la placa electrónica del acondicionador 482C05.

Algunas de las siguientes, son características que se incorporan de serie en el modelo 482C05:

- Led de sobrecarga así como jumper seleccionable de ± 5 V o ± 10 V.
- Fuente de corriente variable ICP, de 0 a 20 mA.
- Jumper seleccionable de modo de entrada de voltaje.
- Jumper seleccionable en ganancia de x1, x10, x100.
- Indicador luminoso de encendido en el panel frontal.
- Panel trasero con conectores BNC (conectores de entrada / salida).
- Conexión opcional de filtros paso bajo de tipo 477A con diferentes frecuencias disponibles de dos polos.

Para el óptimo procesado de la señal en el caso de los sensores de fuerza/par utilizados, se contaba con los siguientes elementos:

- Tarjeta PCI acondicionadora de señal JR3: basado en placas PCI conectadas al bus del PC, utilizando procesadores de señales digitales (DSP), que puede proporcionar datos desacoplados y filtrados a una frecuencia de 8 kHz por canal (Figura 3.24). La tarjeta contiene los circuitos necesarios para recibir la señal digital en forma de flujo de datos, desde el sensor que se encuentra instalado en el sistema. Al mismo tiempo, proporciona el voltaje y corriente necesaria para el correcto funcionamiento del sensor de fuerza desde la misma placa. Esto se realiza con un cable de seis hilos, desde la placa PCI conectada al PC, hasta el extremo del sensor. La señal diferencial, permite distancias suficientes desde el PC hasta el extremo del robot. Mediante un *software*-interfaz, se puede monitorizar los valores.

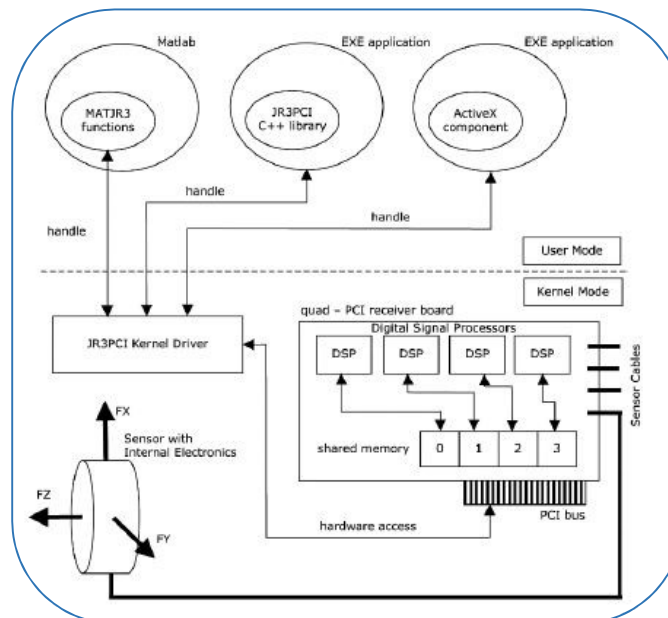


Figura 3.24: Esquema de funcionamiento de la tarjeta procesadora de señal PCI JR3.

- Acondicionador de señales ATI: El acondicionamiento de señal de este sensor, sigue el esquema mostrado en la figura 3.25:

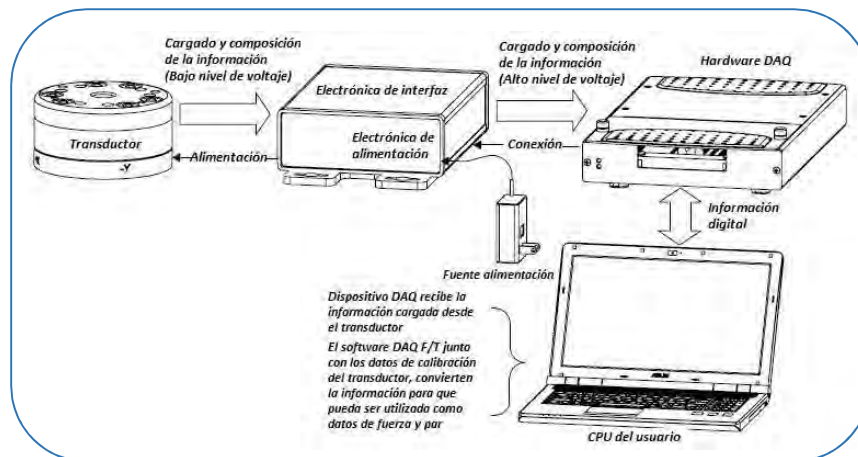


Figura 3.25: Esquema general de acondicionamiento del sensor fuerza/par ATI.

3.2.4.4 Sistema de adquisición de datos

Una vez acondicionadas las señales analógicas emitidas por los diversos acelerómetros, son digitalizadas por el *hardware* DAQ (*Data Acquisition*) que actúa como la interfaz entre el PC y las señales del mundo exterior. Este dispositivo, también cuenta con dos contadores para sendos encoders magnéticos. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que un PC pueda interpretarlas (Figura 3.26). En este caso, el *software* que permite procesar y grabar los datos será el lenguaje de programación LabVIEW.



Figura 3.26: Esquema general de uso del DAQ.

Los componentes centrales de este dispositivo DAQ son el circuito de acondicionamiento de señales, el convertidor analógico-digital (ADC) y un bus PC, así como los convertidores digitales-analógicos (DAC's) que envían señales analógicas, las líneas de E/S (entrada/salida) digital que reciben y envían señales digitales y los contadores/temporizadores capaces de contar y generar pulsos digitales.

En la figura 3.27, se puede observar el NI (*National Instruments*) DAQPad - 6251 instalado en el banco de ensayos. Éste presenta una diversa cantidad de pines que están destinados a señales analógicas (pines 1-32) y digitales/programables (pines 65-96).

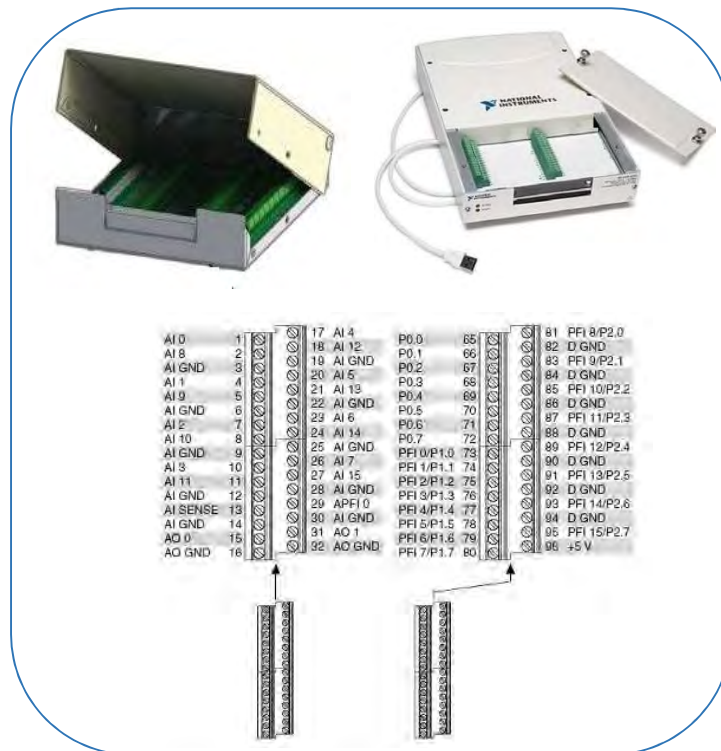


Figura 3.27: Hardware DAQ y pines de conexión.

El último componente de un sistema completo DAQ es el *software*. La computadora recibe la información virgen a través del dispositivo de adquisición de datos. La aplicación presenta y manipula la información en una forma que se pueda comprender. El *software* también controla el sistema DAQ, indicando al dispositivo cuando y de qué canales adquirir datos. El *software* actúa como un simple interfaz de programación para controlar la entrada analógica, salida analógica, E/S digitales y contadores/temporizadores en centenares de multifunciones de dispositivos *hardware* DAQ.

El sistema de medida consiste en las siguientes aplicaciones informáticas principales:

- LabVIEW: *Software* destinado a crear una aplicación para enviar comandos al *driver*, adquirir, analizar y representar los datos.
- NI-DAQ: *Software* que controla el dispositivo DAQ.
 - NI-DAQmx: El NI-DAQmx es el *driver* destacado de NI-DAQ con nuevas VIs, funciones, y herramientas de desarrollo para controlar los dispositivos de medida. Proporciona un interfaz de usuario y un sistema de herramientas para programar y configurar el dispositivo DAQ. El NI-DAQmx incluye las siguientes ventajas:

- El *DAQ assistant*, es un interfaz gráfica para configurar tareas, canales, y escalas de medida del NI-DAQmx para el uso en LabVIEW.
 - Funcionamiento creciente, incluyendo una E/S analógica simple más rápida.
 - Un API (*Application Programming Interface*) más simple para crear aplicaciones DAQ usando menos funciones y *VIs* que en versiones anteriores de NI-DAQ.
 - Funcionalidad ampliada en LabVIEW incluyendo los *Property Nodes* para la adquisición de datos y mejorado de la forma de onda ayudando a la entrada-salida analógica y digital.
- *Measurement & Automation Explorer (MAX)*: Es el *software* de comunicación entre LabVIEW y NI-DAQ.
- El MAX es una aplicación basada en Windows que se instala al mismo tiempo que el NI-DAQ. Se utiliza MAX para configurar y testear el *software* y el *hardware* de NI, añadir nuevos canales e interfaces, ejecutar diagnósticos del sistema y visualizar los dispositivos e instrumentos conectados al sistema. El MAX dispone de las siguientes funciones a destacar:
 - *Data Neighborhood*: proporciona el acceso a la configuración de los canales físicos en el sistema, incluyendo los canales virtuales DAQ y las tareas.
 - *Devices and Interfaces*: enumera el *hardware* NI instalado y detectado. También incluye una autoprueba (*self-test*), los paneles de prueba, reajuste, características, y las utilidades de autocalibrado para los dispositivos de configuración y de prueba.
 - *Remote Systems*: Sistema de acceso remoto al *hardware*.

3.2.5 Motores

A continuación se especifican los modelos de motores utilizados para los actuadores flexibles con rigidez variable.

- Motor principal: Modelo RE - 50 37354 (Figura 3.28) con las siguientes características (Tabla X):

Tabla X: Características del motor principal.

Datos del motor	Valor
Voltaje nominal	24 V
Velocidad sin carga	5950 rpm
Corriente sin carga	236 mA
Velocidad nominal	5690 rpm
Par nominal	406 N·m
Corriente nominal	10,9 A
Especificaciones	Valor
Thermal time constant winding	71,70 s
Thermal time constant motor	1370 s
Máxima velocidad permisible	9500 rpm
Número de pares de polos	1
Máxima eficiencia	94 %



Figura 3.28: Motor principal.

- Motor secundario: Modelo RE - 30 310007 (Figura 3.29) con las siguientes características (Tabla XI):

Tabla XI: Características del motor secundario.

Datos del motor	Valor
Voltaje nominal	24 V
Velocidad sin carga	8810 rpm
Corriente sin carga	164 mA
Velocidad nominal	8050 rpm
Par nominal	85 N·m
Corriente nominal	3,44 A
Especificaciones	Valor
Thermal time constant winding	16,2 s
Thermal time constant motor	714 s
Máxima velocidad permisible	12000 rpm
Número de pares de polos	1
Máxima eficiencia	87 %



Figura 3.29: Motor secundario.

A continuación, en la figura 3.30, se puede observar en un modelo CAD la disposición de ambos motores en AVASTT. Para el caso de MMJS, la disposición es idéntica, a excepción del motor secundario del que se prescinde.

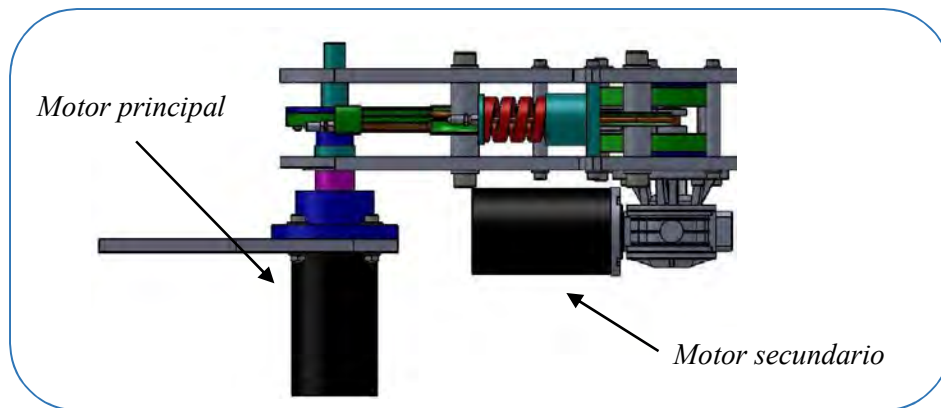


Figura 3.30: Disposición de los motores principal y secundario en AVASTT.

3.2.6 Controladores EPOS2

EPOS2 es un controlador de posición construido de forma modular (Figura 3.31). Dispone de varios modos de operación que permiten su adaptación flexible a un amplio conjunto de accionamiento principalmente destinados a la automatización y mecatrónica.

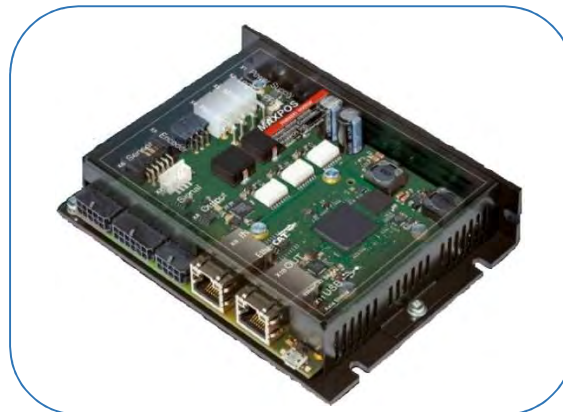


Figura 3.31: Controlador electrónico de posición EPOS2.

Está basado en un control programable que combina la retroalimentación y la prealimentación (*feed forward*), permitiendo un comportamiento ideal del movimiento. Además, cuenta con librerías estándar para el control de movimiento y supervisión-adquisición de datos para la monitorización y control de procesos vía USB o CANopen, simplificando de manera considerable la integración en sistemas más amplios.

En el banco de ensayos, se instalaron e interconectaron dos unidades a través de CANopen, estableciéndose así una red (Figura 3.32) y una coordinación a través de la interfaz HMI implementada.

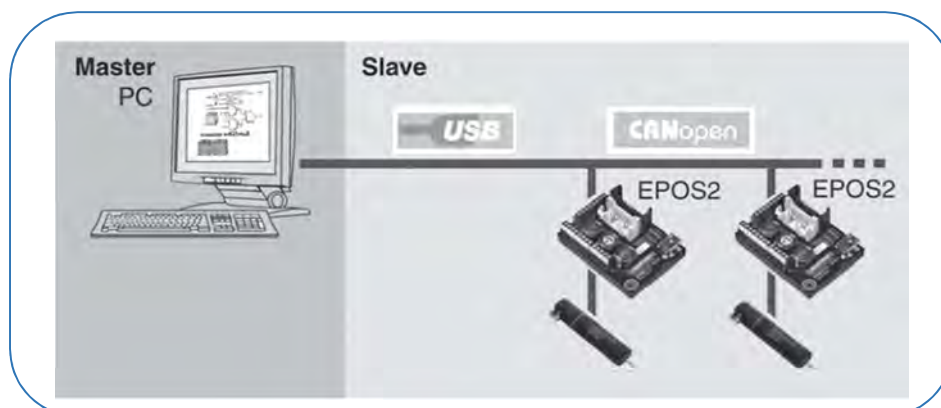


Figura 3.32: Esquema de la red de EPOS2 creada a través CANopen y USB.

Estos dispositivos representan el actual grado de miniaturización en el diseño de controladores de posicionamiento, lo que implica más potencia, más funcionalidad y más comodidad en menos espacio. Ideal para los dispositivos AVASST y MMJS.

A continuación se puede observar algunas de las características principales de los dos dispositivos utilizados para sendos motores:

- EPOS 70/10 (motor principal): Apto para motores CC de escobillas con encoder o para motores EC (*Electronically Commutated*) sin escobillas con sensores *Hall* y encoder desde 80 hasta 700 W (Tabla XII).

Tabla XII: Características EPOS2 70/10

Datos eléctricos	Valor
Tensión de alimentación	11-70 VDC
Máxima corriente salida	25 A
Frecuencia de conmutación	50 kHz
Velocidad muestreo del PI=control de corriente	10 kHz
Velocidad muestreo del PI=control de velocidad	1 kHz
Velocidad muestreo del PID=control de posición	1 kHz
Entradas	Valor
Señales de los sensores	H1, H2, H3
Señales encoder	A,A\,B,B\,I,I\ (máx. 5 MHz)
Entradas digitales	10 (7 optoacopladas, 3 diferencial)
Entradas analógicas	2 (diferencial)
CAN-ID	Resolución 12 bit, 0..+5 V Configurable con interruptor DIP 1...7
Salidas	Valor

Salidas digitales	5 (4 optoacopladas, 1 diferencial)
Salidas analógicas	---
Voltajes de salida encoder	+5 VDC, máx. 100 mA
Interfaces	Valor
RS232	RxD; TxD (máx. 115200 bit/s)
CAN	High; low (máx. 1 Mbit/s)
USB 2.0/3.0	Data+; data- (máx. 12 Mbit/s)
Indicador	Valor
LED verde=READY, rojo=ERROR	LED verde, LED rojo
Datos mecánicos	Valor
Peso	Apróx. 330 g
Dimensiones (L x a x a)	150 x 93 x 27 mm

- EPOS 50/5 (motor secundario): Apto para motores CC de escobillas con encoder o para motores EC sin escobillas con sensores *Hall* y encoder desde 5 hasta 250 W (Tabla XIII).

Tabla XIII: Características EPOS2 50/5.

Datos eléctricos	Valor
Tensión de alimentación	11-50 VDC
Máxima corriente salida	10 A
Frecuencia de conmutación	50 kHz
Velocidad muestreo del PI=control de corriente	10 kHz
Velocidad muestreo del PI=control de velocidad	1 kHz
Velocidad muestreo del PID=control de posición	1 kHz
Entradas	Valor
Señales de los sensores	H1, H2, H3
Señales encoder	A,A\,B,B\,I,I\ (máx. 5 MHz)
Entradas digitales	11 (7 optoacopladas, 4 diferencial)
Entradas analógicas	2 (diferencial)
CAN-ID	Resolución de 12 bit, ± 10 V Configurable con interruptor DIP 1...7
Salidas	Valor
Salidas digitales	5 (4 optoacopladas, 1 diferencial)
Salidas analógicas	---
Voltajes de salida encoder	+5 VDC, máx. 100 mA
Interfaces	Valor

RS232	RxD; TxD (máx.115200 bit/s)
CAN	High; low (máx. 1Mbit/s)
USB 2.0/3.0	Data+; data+- (máx. 12Mbit/s)
Indicador	Valor
LED verde=READY, rojo=ERROR	LED verde, LED rojo
Datos mecánicos	Valor
Peso	Apróx. 240 g
Dimensiones (L x a x a)	120 x 93,5 x 27 mm

En la figura 3.33 se puede observar ambos EPOS2 ya instalados en la bancada.



Figura 3.33: EPOS2 en el banco de ensayos: 50/5 (izquierda) y 70/10 (derecha).

3.3 Controlador a bajo nivel

A continuación, se introducen las bases teóricas de los sistemas de control utilizados en los VSA. Dichas teorías desarrollan el concepto de motor como fuente de par-corriente y como fuente de posición.

En la figura 3.34 y tabla XIV se puede observar el esquema de control a bajo nivel que se encarga de gobernar todo el sistema del banco de ensayos.

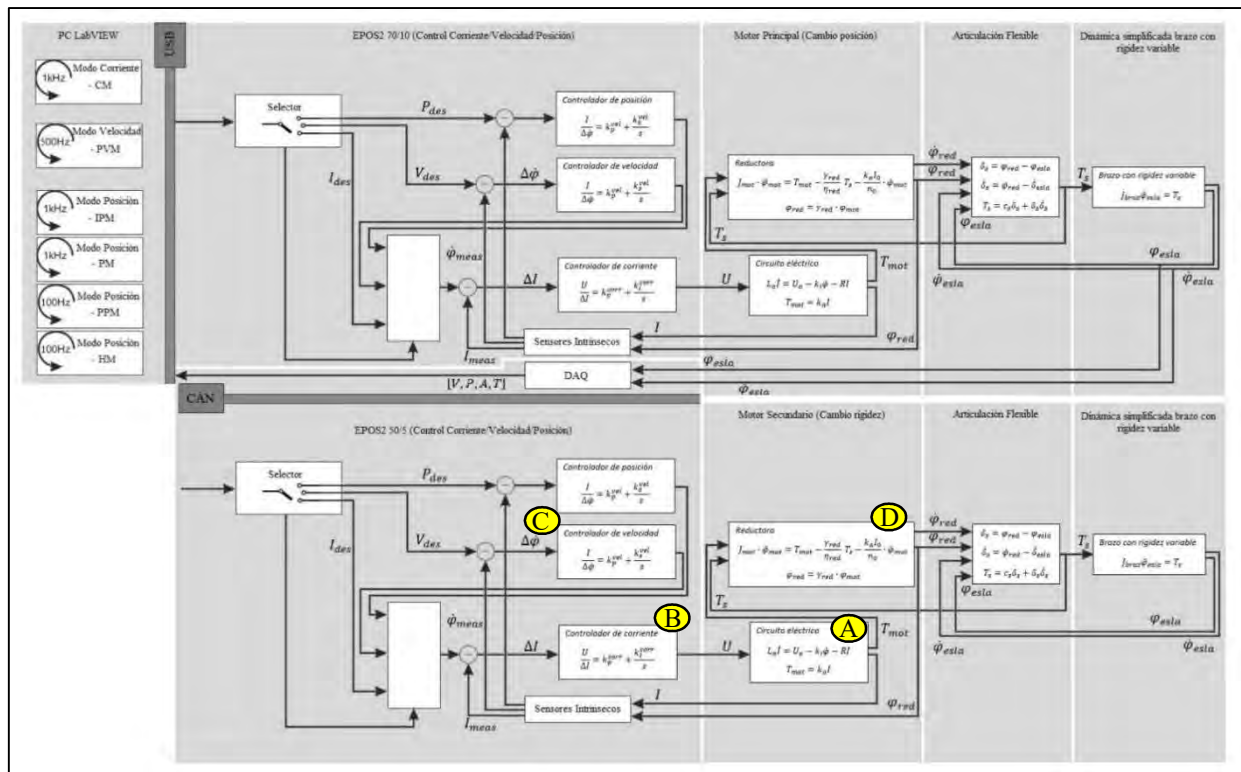


Figura 3.34: Esquema del controlador a bajo nivel.

Tabla XIV: Parámetros del esquema del controlador a bajo nivel.

Parámetros					
I	corriente del motor	L_a	inductancia del motor	R	resistencia del motor
U_a	voltaje del motor	k_a	constante de par	k_i	constante velocidad
J_{mot}	inercia motor y reductora	γ_{red}	ratio transmisión reductora	η_{red}	eficiencia de la reductora
I_0	corriente sin carga	n_0	velocidad sin carga	δ_s	deflexión rigidez
φ_{mot}	ángulo del motor	φ_{red}	ángulo reductora	φ_{esla}	ángulo eslabón
T_s	respuesta/par articulación	J_{braz}	inercia oscilación brazo		



3.3.1 Motor como fuente de par

Un motor eléctrico, es conocido generalmente en la literatura como fuente de par (Isermann, 2005). En el nivel más bajo del control, el circuito eléctrico (A) se regula mediante una corriente de control (B) para conseguir un par motor deseado $T_m = k_a I$ que acelera el rotor y la reductora, respectivamente. Este bucle de retroalimentación interno de la electrónica del motor, es típicamente muy rápido (BW (Bandwidth) ≥ 1 kHz) y por lo tanto, es posible asumir $I = I_{des}$ para el posterior diseño del control.

Si se hace uso de esta relación lineal entre la corriente del motor y el par, siendo la consigna de corriente I_{des} calculada como una función del par elástico deseado y real T_s :

$$I_{des} = C_{s \rightarrow I}^{FB}(T_{s,des} - T_s) + C_{s \rightarrow I}^{FF}$$

Éste utiliza un controlador de retroalimentación $C_{s \rightarrow I}^{FB}$ y un compensador *feed-forward* $C_{s \rightarrow I}^{FF}$. En los primeros trabajos de Pratt y Williamson (1995), relacionados con actuadores elásticos articulares, $C_{s \rightarrow I}^{FB}$ está diseñado como control PID y la compensación *feed-forward* $C_{s \rightarrow I}^{FF}$ se utiliza para contrarrestar la carga externa y para acelerar el motor, respectivamente. Enfoques más elaborados utilizan técnicas denominadas “basadas en modelos” y observadores de perturbación (por ejemplo Kong et al., 2009; Paine y Sentis, 2012). En este caso, se utilizó un control PI como control de la corriente, debido a su mejor integración en el sistema. Una importante dificultad y desventaja de este método directo, es establecer modelos precisos para compensar adecuadamente la fricción de la reductora, la fricción estática o las holguras.

3.3.2 Motor como fuente de posición

Para superar estas deficiencias, Pratt et al. (2004) sugirió posteriormente considerar la combinación del motor y la reductora como un dispositivo controlado por posición. Con dicho fin, un bucle de retroalimentación en cascada adicional (C) se puede utilizar para regular la posición del motor (D). Esto se describe en una formulación genérica como

$$I_{des} = C_{\dot{\phi}_{mot} \rightarrow I}^{FB}(\dot{\phi}_{mot,des} - \dot{\phi}_{mot}) + C_{\dot{\phi}_{mot} \rightarrow I}^{FF}$$

La parte de retroalimentación $C_{\dot{\phi}_{mot} \rightarrow I}^{FB} = k_p^{vel} + \frac{k_i^{vel}}{s}$ se implementa principalmente como un controlador PI. Adicionalmente, la compensación *feed-forward* $C_{\dot{\phi}_{mot} \rightarrow I}^{FF}$ mejora aún más el comportamiento del seguimiento de la referencia en posición. En contraste con el método anterior, este lazo de velocidad compensa los efectos no deseados de la fricción de la reductora, típicamente con un ancho de banda en el orden de 100 Hz.

Convencidos por estos beneficios, diferentes grupos (por ejemplo, Pratt et al., 2004; Vallery et al., 2007; Wyeth, 2006) realizaron tal estructura en cascada y diseñaron el bucle de control de par elástico mediante

$$\dot{\phi}_{mot,des} = C_{s \rightarrow \dot{\phi}_{mot}}^{FB} (T_{s,des} - T_s) + C_{s \rightarrow \dot{\phi}_{mot}}^{FF}$$

El compensador de retroalimentación $C_{s \rightarrow \dot{\phi}_{mot}}^{FB} = k_p^s + \frac{k_i^s}{s} + k_d^s s$ se realiza principalmente como un controlador PID mientras que la parte FF se utiliza para compensar el movimiento de la articulación.

3.3.3 Implementación

La elección de la estructura de control no solo está fuertemente influenciado por las propiedades mecánicas del actuador (como pueden ser las propiedades del motor y de la reducción planetaria), sino también por el control electrónico a través de dispositivos que estaban caracterizados por la necesidad de integración en el banco con restricciones de tamaño y peso reducidos; lo que impedía utilizar equipos de gran potencia y tamaño, utilizados tan a menudo en este tipo de estudios.

De esta manera, el sistema de control puede estar basado en posición, velocidad o corriente (elección de modo), según las necesidades de experimentación. Se decidió utilizar la estructura mostrada en la figura 3.35, debido en parte, a las siguientes causas:

- Un PC principal (denominado “Maestro”) debía controlar directamente ambos dispositivos EPOS2.
- La información relativa a la posición, debía ser tratada por los EPOS2 y por el *hardware* DAQ.
- Un PC alternativo (denominado “Esclavo”) debía trabajar con los datos recogidos por el sensor fuerza/par, estando siempre subordinado al PC principal.
- La información proveniente de los encoders magnéticos, debía ser manejada en el DAQ.
- Toda la monitorización debía realizarse en el PC principal.

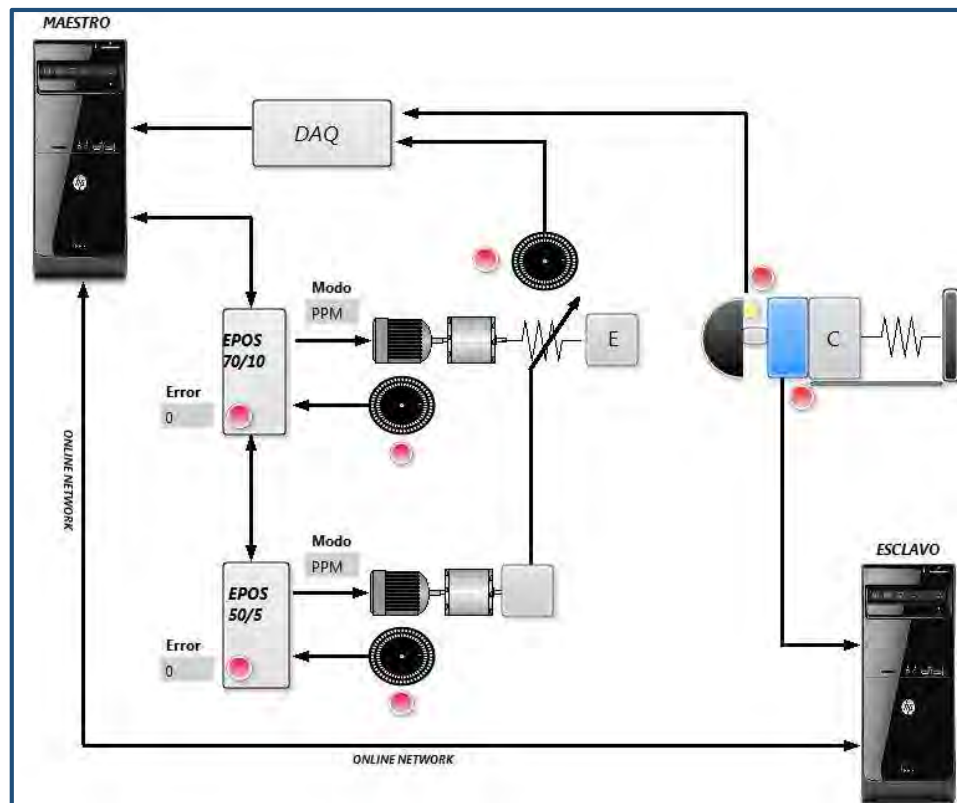


Figura 3.35: Esquema general de control para todo el banco de ensayos.

Partiendo de las mencionadas causas, se puede apreciar cómo se consiguieron integrar todas las necesidades. El PC Maestro está conectado al EPOS2 70/10 encargado del movimiento del VSA y, éste a su vez, está enlazado al EPOS2 50/5 responsable del cambio de rigidez. La información recogida por ambos controladores electrónicos, así como de los encoders de dichos sistemas, serán tratados en el PC Maestro.

El dispositivo DAQ, recibirá la información que desprendan los encoder magnéticos situados en la zona de impacto y/o otras zonas, dependiendo de la configuración del ensayo. Dichos datos, estarán posteriormente disponibles en el Maestro.

Por último, el PC Esclavo, está únicamente destinado a procesar las mediciones del sensor fuerza/par; siempre bajo la supervisión y el control del PC Maestro. Es por ello, que ambas estaciones comparten información vía *network*.

Además, todo el software creado está perfectamente sincronizado y altamente optimizado para que todos los dispositivos y sistemas operen con el mayor rendimiento posible.

4 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

4.1 Introducción

Hasta ahora, AVASTT y MMJS habían sido llevados a la práctica exclusivamente mediante la construcción mecánica de ambos prototipos, pero no se había disfrutado de la posibilidad de realizar *test* y ensayos en un entorno real. La bancada construida por la UC3M, constituía por fin un “*hardware*” en el que llevar a cabo diferentes pruebas. Gracias a esta infraestructura, se resolvía el problema de equipamiento, quedando pendiente el último y más importante desarrollo: el control.

Es por ello, que el presente trabajo de fin de grado se centró en la necesidad de diseñar e implementar una estación HMI para el control y la monitorización de los diferentes elementos que integran el banco. Para cumplir este objetivo, era necesario contar con una base de programación versátil que tuviera la propiedad de combinar el control a bajo nivel y a alto nivel. LabVIEW es el lenguaje de programación gráfico adecuado para desarrollar este tipo de aplicaciones basados en pruebas, control y medidas.

Al tratarse de una herramienta gráfica de programación, los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando su comprensión. Consta de dos partes bien diferenciadas:

- Panel Frontal: es la interfaz con el usuario (HMI), utilizada para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. Los usuarios podrán observar los datos del programa actualizados en tiempo real. En esta interfaz se definen los controles (entradas, botones, marcadores, etc.) y los indicadores (salidas, gráficas, etc.).
- Diagrama de Bloques: zona de implementación del programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, basándose en íconos que realizan una determinada función y se interconectan.

Gracias a este doble entorno de diseño, se cubrían las necesidades para dejar el banco completamente operativo, desarrollándose el control de los actuadores e instrumentos de medida y, paralelamente, el enlace entre el operador y todos los equipos que conforman la bancada de impactos.

4.2 Requerimientos

Debido a la diversidad de los equipos e instrumentos que conforman el banco, así como sus respectivas funcionalidades específicas, era necesario realizar en primer lugar un desarrollo por partes, para posteriormente, realizar la integración de dichas partes en una sola. Así pues, el diseño *software* se fraccionó en:



❖ Control de motores

Donde la finalidad buscada es que el actuador en uso respondiera correctamente a las diferentes configuraciones de operación en los ensayos; como pueden ser, control mediante posición, velocidad, corriente, interpolación de posiciones, etc. Para ello se cuenta con los controladores EPOS2, los cuales serán los encargados de transmitir la configuración y órdenes del operador a los motores, para que realicen los ajustes necesarios.

Por tanto, esta parte de desarrollo que conforma el “corazón” del control de los actuadores de rigidez variable, tendrá como objetivo configurar las comunicaciones y los controladores EPOS2, los parámetros de los motores y la configuración de los diferentes modos de operación.

❖ Sensores

○ Acelerómetros

Necesarios para tomar los datos de procedentes de los impactos hombre-robot. Dicha parte de desarrollo *software* estará centrada en la configuración de los diferentes parámetros de lectura procedentes de los acelerómetros; como pueden ser, la definición de canales, número de acelerómetros a activar, escalas, nombres, conexiones, máximos, mínimos, etc.

○ Encoders

Orientados a la toma de datos relacionados con las posiciones relativas en diferentes zonas del banco. Al igual que en los acelerómetros, necesitaban una configuración de parámetros de adquisición, asociados a dichos equipos de medida; como pueden ser la configuración de canales, número de encoders a activar, pulsos/revolución, modo de lectura, frecuencia y tamaño del *buffer* de lectura, etc.

○ Sensor de fuerza/par

Es necesario realizar una mención especial de este sensor, debido a la implementación de sus lecturas en una estación esclava. El desarrollo *software* se centró en la inicialización del sensor, definición de las escalas, filtros, *offsets*, etc. Todo ello, subordinado a la estación maestra, con la que intercambiará información.

○ Sensores internos

Integrados en los dispositivos EPOS2 o en los motores, el objetivo era desarrollar la configuración para el guardado de dichos parámetros (corriente, velocidad y posición) si así fuera deseado por parte del operador.

❖ Adquisición de datos y monitorización

Tras la selección y la configuración de los sensores por parte del operador, es necesario recoger y tratar la información procedente de dicha instrumentación para la correcta visualización en la estación. Por tanto, el desarrollo estuvo basado en el tratamiento y monitorización de los datos procedentes de los acelerómetros, encoders y fuerza/par, así como de los sensores internos de los motores.

❖ Gestión de la información (cargado y guardado)

Otra parte vital, es la orientada al correcto guardado/cargado de los datos adquiridos. Para ello, era necesario una correcta gestión *upload/download* de las configuraciones de los motores, así como de los diferentes parámetros de posición, velocidad, corriente, aceleración y fuerza/par procedente de todo el banco.

❖ Gestión de errores

Por último, y no por ello menos importante, era necesario que el operador pudiera disponer de información detallada en caso de error, para poder actuar de forma correctiva si así lo considerara necesario. De la misma manera, era imprescindible proporcionarle herramientas para el reinicio y la limpieza de posibles fallos detectados.

4.3 Diagrama de conceptos del funcionamiento del programa

Al tratarse de un programa con un gran número de pantallas HMI, así como de posibles funciones a configurar, modos de operación, modos de carga, etc., no es factible describir el diagrama de flujo completo que gobierna el *software*. Como solución, se presenta un diagrama conceptual, que muestra al lector el funcionamiento general del programa para el control del banco de ensayos. De esta manera más simplificada, se puede observar la ejecución a *grosso modo* para la comprensión global del sistema (Figura 4.1).

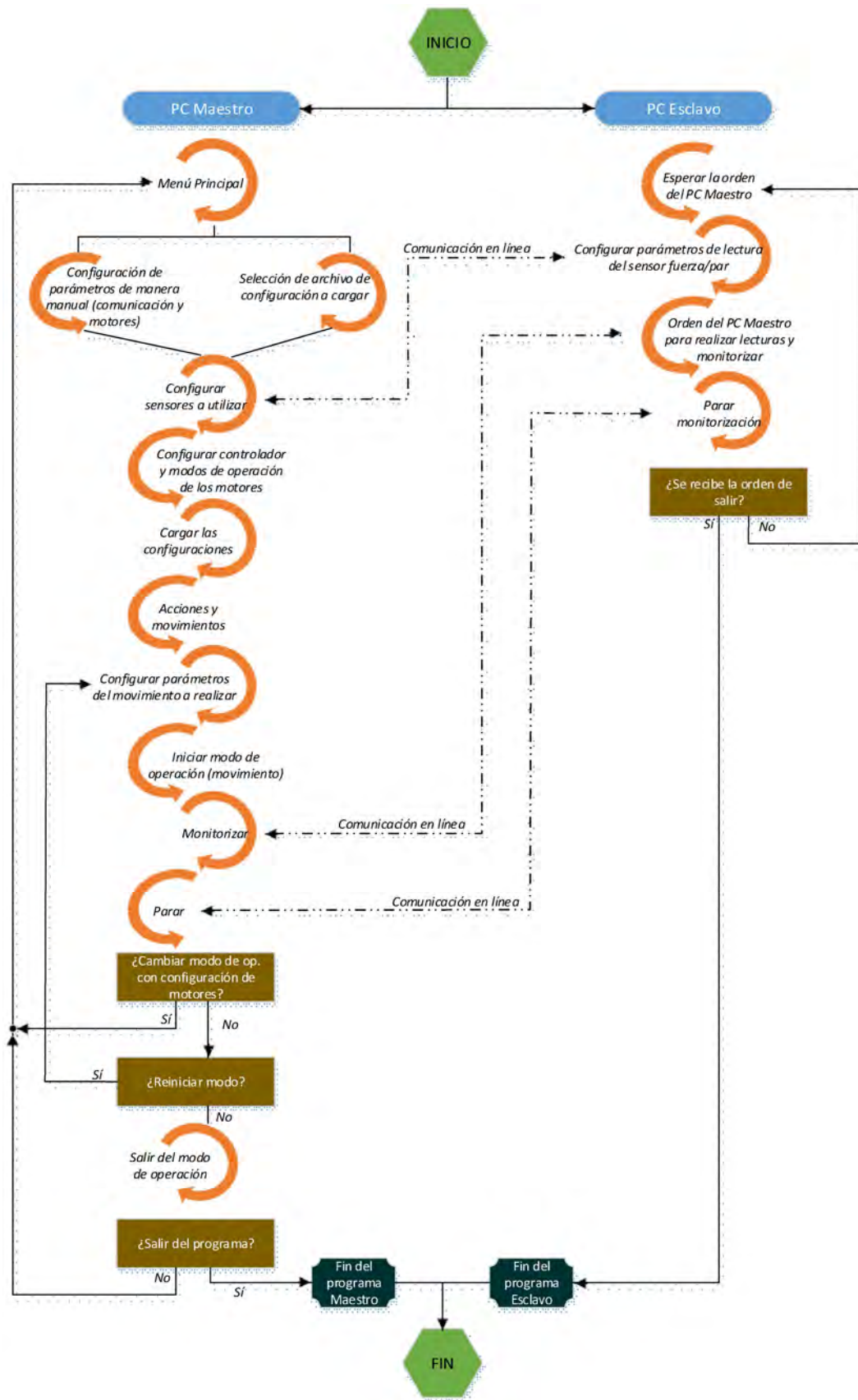


Figura 4.1: Diagrama conceptual de funcionamiento.

4.4 Configuración

A continuación, se realizará una descripción de los diferentes parámetros a configurar por el operador a través del HMI, como paso previo y necesario para poder realizar una operación con el banco de ensayos. El *software* creado será accesible a través del menú principal mostrado en la figura 4.2.

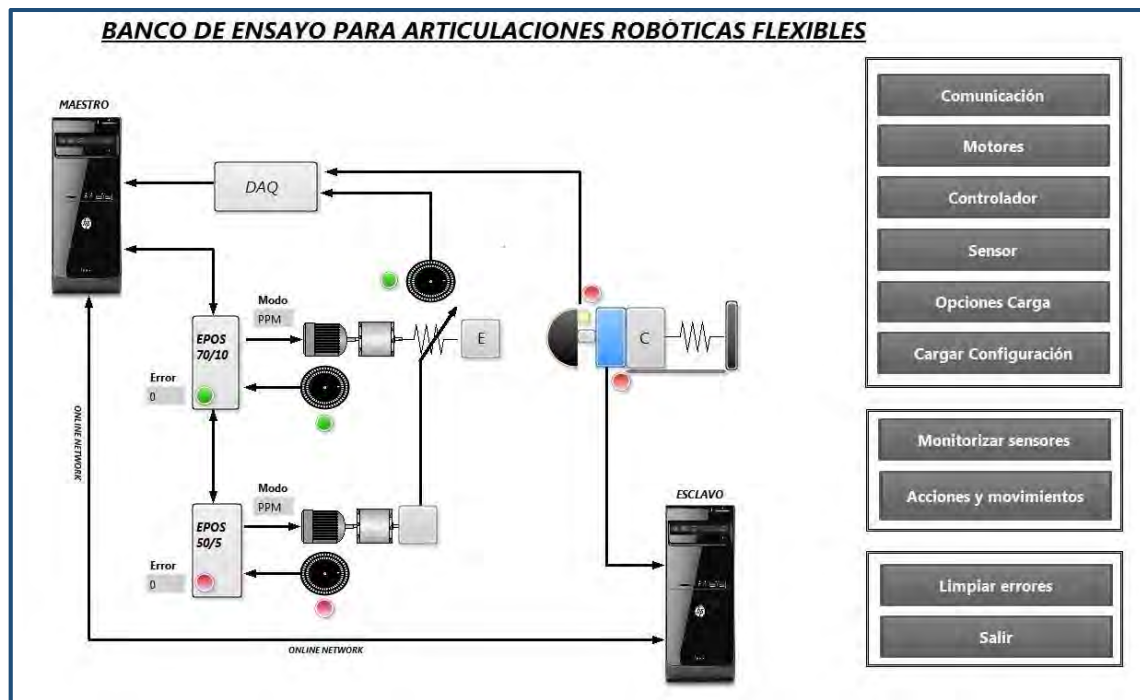


Figura 4.2: Menú principal del HMI para el control del banco de ensayos.

En dicho menú se mostrará el esquema general del sistema, así como su estado, mediante una serie de luces que indicaran si los instrumentos están conectados (verde) o desconectados/en fallo (rojo). También se podrá observar el modo de operación cargado para cada EPOS, a través de un pequeño indicador denominado “Modo”. Para acceder a todas las funcionalidades del banco, el operador dispone de una serie de botones que le permitirán configurar todo el sistema, para ajustarlo en función del ensayo a realizar.

A continuación, se describirán todas las opciones disponibles a modelar y ejecutar, al igual que se detallará la programación de bajo nivel asociada a cada interfaz.

4.4.1 Comunicaciones

Como cualquier dispositivo electrónico que forma parte de una red, es necesario definir los parámetros de comunicación de los controladores electrónicos EPOS2 con el computador maestro, como podrá observar el operador del banco mediante la siguiente pantalla (Figura 4.3).



Figura 4.3: Panel frontal de las comunicaciones.

En esta interfaz, el operador deberá verificar la correcta configuración de los parámetros introducidos; los cuáles, se describen a continuación (Tabla XV):

Tabla XV: Parámetros y descripción a configurar en la pantalla de comunicaciones.

Parámetro	Descripción
Nombre de dispositivo	EPOS2 (por defecto).
Nombre de protocolo	MAXON SERIAL V2 (por defecto).
Nombre de interfaz	USB (por defecto), aunque existe la posibilidad de RS232 y CANopen.
Nombre del puerto	USB0 (por defecto). Otras posibilidades USB1, COM1, COM2, CAN0, CAN1.
Baudios	Velocidad de comunicación en bits/s.
Tiempo	Tiempo máximo para verificar la comunicación (en ms).
ID EPOS 70/10	Identificación del nodo del dispositivo en la red.
ID EPOS 50/5	Identificación del nodo del dispositivo en la red.

Nota: Para más detalle, referirse: EPOS Comand Library, cap. 3 Initialization Functions, 3.1 Communication.

Asociado a esta pantalla HMI para el operador, y realizando un enfoque a nivel bajo, la estructura de configuración de la comunicación es la siguiente (Figura 4.4):

Parámetros de comunicación a definir por el operador, unificados por un cluster

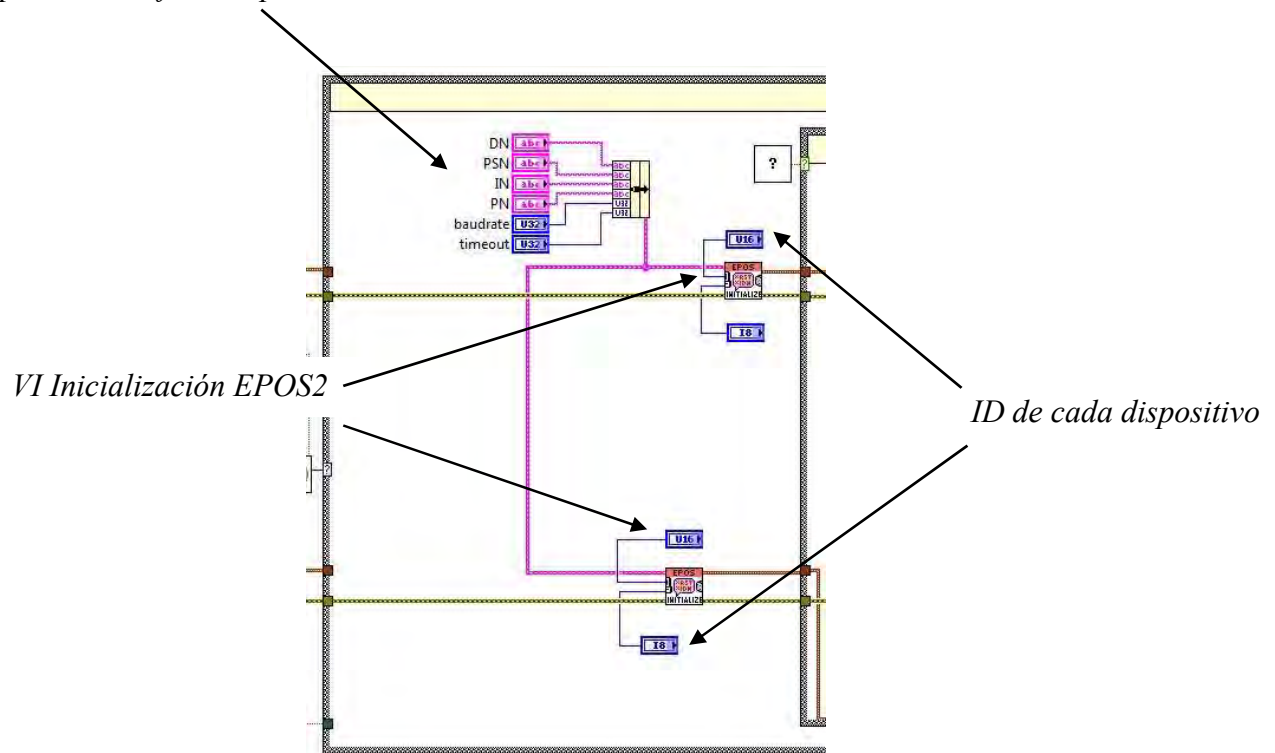


Figura 4.4: Diagrama de bloques asociado a las comunicaciones.

Como se puede observar, la información definida por el operador es recogida a través de un *cluster* (agrupa elementos de datos de diferentes tipos) que comprime la información en un solo hilo y que será fundamental para la posterior carga en el *VI* (*Virtual Instrument*) de inicialización de ambos EPOS2. Por una cuestión meramente visual y de organización, se colocaron los *ID* (*Identification*) cerca de cada *VI* de inicialización de EPOS2, como puede verse en la figura 4.4.

4.4.1.1 Modo de operación

La selección del modo de operación, como su propio nombre indica, define el tipo de movimiento a realizar por el actuador. El operador visualizará la siguiente pantalla, para realizar la elección (Figura 4.5):

Selector de 3 posiciones

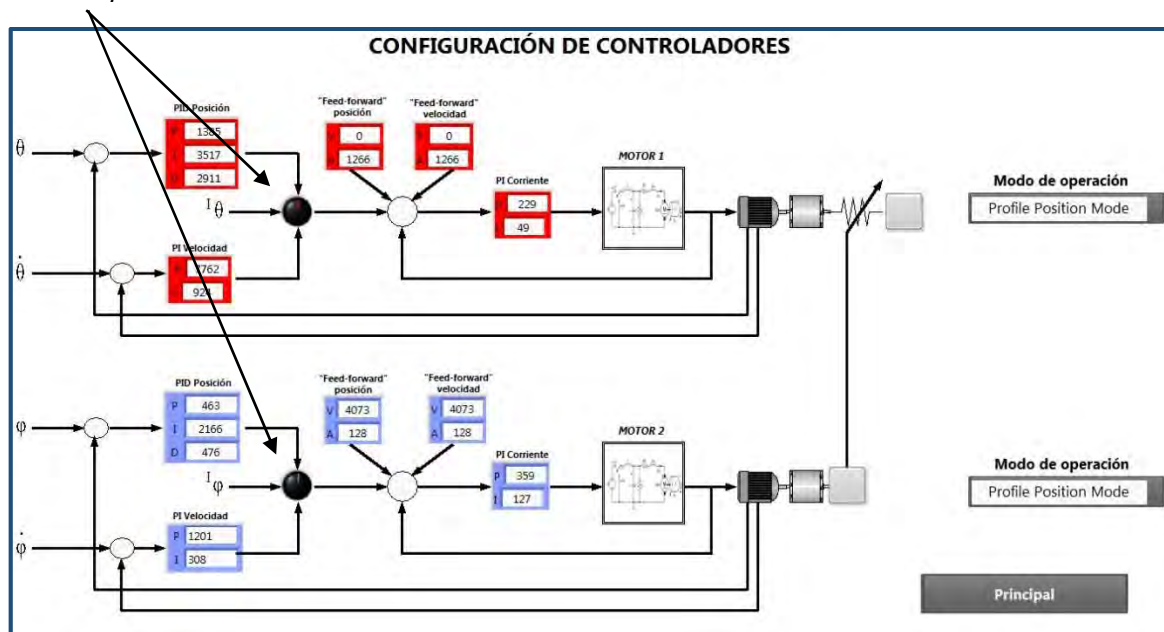


Figura 4.5: Panel frontal de la configuración de controladores.

Como se puede observar en la figura 4.5, existe un control para el motor principal (rojo) y otro para el motor secundario (azul). Cada uno consta de un selector de tres posiciones que indica el principio sobre el que se basa el modo de operación (posición, velocidad o corriente); y según esa selección, automáticamente la casilla denominada “Modo de operación” permitirá al operador elegir entre aquellos modos de operación del motor que se ajusten al principio de funcionamiento seleccionado. Un ejemplo de ello, se puede ver en la figura 4.6, donde el selector apunta al principio de funcionamiento en posición y la selección de operación se ajusta a los modos basados únicamente en posición. En la figura 4.7, el selector apunta el principio de funcionamiento en velocidad, y la selección de operación se ajusta a los modos basados en velocidad.

Selector en modo Posición

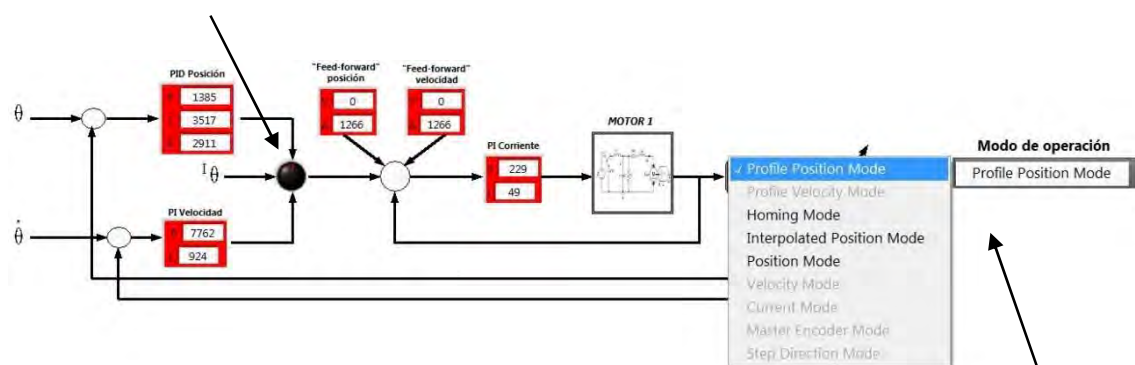


Figura 4.6: Ejemplo de configuración del controlador del motor principal en modo de posición.

Casilla de selección de modo de operación, basada en Posición

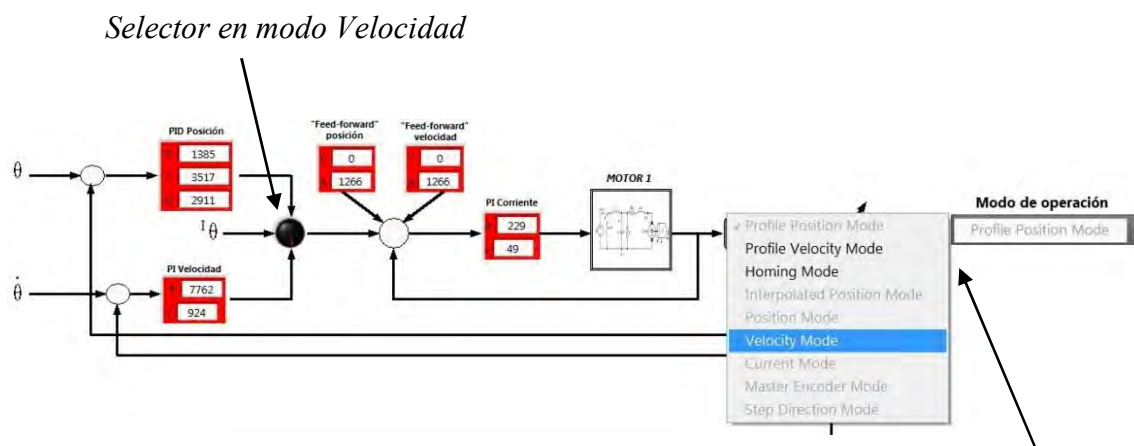


Figura 4.7: Ejemplo de configuración del controlador del motor principal en modo de velocidad.

Casilla de selección de modo de operación, basada en Velocidad

El total de modos de operación seleccionables por el operador se muestra en la siguiente tabla (Tabla XVI):

Tabla XVI: Modos de operación seleccionables por el operador.

Modo de operación	Descripción
Position Mode	Modo para dirigir el actuador hacia un punto definido por el usuario. No es un generador de trayectorias, lo que implica que al indicarle la posición deseada, no realizará una trayectoria controlada para llegar a dicho punto, sino que se dirigirá a él con los máximos valores posibles. En posicionamientos muy largos, suelen producirse errores, bien porque el punto objetivo está fuera del alcance, o porque se producen desfases entre el posicionamiento calculado y el medido.
Profile Position Mode	Este modo genera una trayectoria para desplazar el sistema a una posición definida. Esa posición, puede ser absoluta (respecto al origen de posiciones del actuador) o relativa (respecto al punto actual del actuador). Se puede elegir la forma de la trayectoria generada para la consecución del punto objetivo. Dichas formas son trapezoidal o sinusoidal (por defecto sinusoidal).
Interpolated Position Mode	Éste genera trayectorias mediante la función “ <i>cubic spline interpolation</i> ”. El operador define todos los puntos por los que el actuador pasará para conseguir la posición final objetivo. Se debe especificar cada punto/s en <i>qc</i> (cuentas), la velocidad de llegada a ese punto (rpm) y el tiempo de llegada entre ese punto y el anterior (ms, máximo 250 ms). Una vez generada la nube de objetivos, el sistema realizará la interpolación de la trayectoria a realizar, definiendo las velocidades y aceleraciones intermedias entre los puntos definidos.



Velocity Mode	<p>Este modo tiene como objetivo mover el actuador con una velocidad definida por el usuario. No es un generador de trayectorias, por lo tanto, al indicarle la velocidad deseada, no realizará una trayectoria controlada para alcanzar dicha velocidad objetivo, sino que alcanzará la velocidad definida por el operador con los máximos valores posibles.</p> <p>Para altas velocidades, suelen producirse errores, bien porque la velocidad está fuera del alcance, o bien por el desfase producido entre la velocidad calculada y la medida.</p>
Profile Velocity Mode	<p>Este modo de operación, es capaz de controlar el sistema en velocidad. Genera una trayectoria para conseguir la velocidad deseada. Así pues, es posible definir una velocidad objetivo a alcanzar por el sistema, y él se encargará de crear el perfil de velocidad y aceleración óptimo para conseguir dicha velocidad final. Esto se puede conseguir mediante dos tipos de trayectoria: trapezoidal y sinusoidal (por defecto sinusoidal).</p>
Current Mode	<p>Dicho modo, permite operar al actuador en base a la corriente medida. Definiendo un valor máximo en corriente, el operador establece un tope en el modo de operación, de manera que el actuador se moverá siempre y cuando no se supere el parámetro máximo de corriente definido previamente.</p>
Homing Mode	<p>Este modo sirve para encontrar/establecer el cero (0) del sistema en posición.</p> <p>Existen varias formas de encontrar o definir el cero (0):</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Current Threshold Positive & Index</i> - <i>Current Threshold Negative & Index</i> - <i>Current Threshold Positive Speed</i> - <i>Current Threshold Negative Speed</i> - <i>Positive Limit Switch & Index</i> - <i>Negative Limit Switch & Index</i> - <i>Positive Limit Switch</i> - <i>Negative Limit Switch</i> - <i>Home Switch Positive Speed & Index</i> - <i>Home Switch Negative Speed & Index</i> - <i>Home Switch Positive Speed</i> - <i>Home Switch Negative Speed</i> - <i>Actual Position</i> - <i>Positive Index</i> - <i>Negative Index</i> <p><i>Nota: Para más detalle de los distintos métodos, referirse: Maxon Firmware Specification, cap. 4.5, Homing Mode.</i></p>

Desde el punto de vista de la programación a bajo nivel, dicha restricción automática de los modos de operación en base al principio de funcionamiento (posición, velocidad o corriente), se implementa mediante el siguiente diagrama de bloques, mostrado en la figura 4.8:

Opción de modo de funcionamiento (posición, velocidad, corriente) a través de bucle if

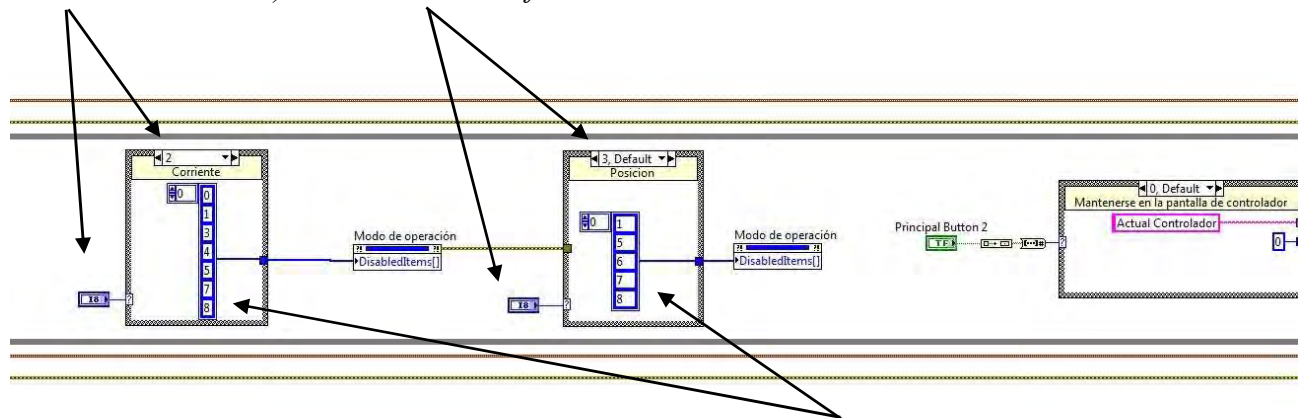


Figura 4.8: Diagrama de bloques en la selección automática del modo de operación en base al principio de funcionamiento.

Array constante que mediante la asignación de los modos de operación a números decimales, indica al programa los modos de operación a mostrar

Como se puede observar, se crearon dos bucles *if*, por los cuales, en función de la opción apuntada por el selector de tres posiciones, se activará un *array* constante que en su interior define los modos de operación seleccionables mediante la asignación de números decimales a cada modo. Posteriormente, esos modos de operación estarán activos en la pestaña “Modo de operación” para el operador del banco, como se ve en las figuras 4.6 y 4.7.

4.4.1.2 Parámetros PID

Los parámetros del PID son fundamentales, ya que ellos caracterizarán el sistema de control a través de un lazo de retroalimentación que permite regular la velocidad, corriente y posición (Figura 4.9).

Es por ello, que es fundamental la correcta sintonización o determinación de estos parámetros para alcanzar de manera efectiva el funcionamiento deseado del sistema. Una posible consecuencia, si no se ajustan adecuadamente estos parámetros, es que el sistema entre en inestabilidad, produciéndose vibraciones en los motores que finalmente originen daños irreparables.

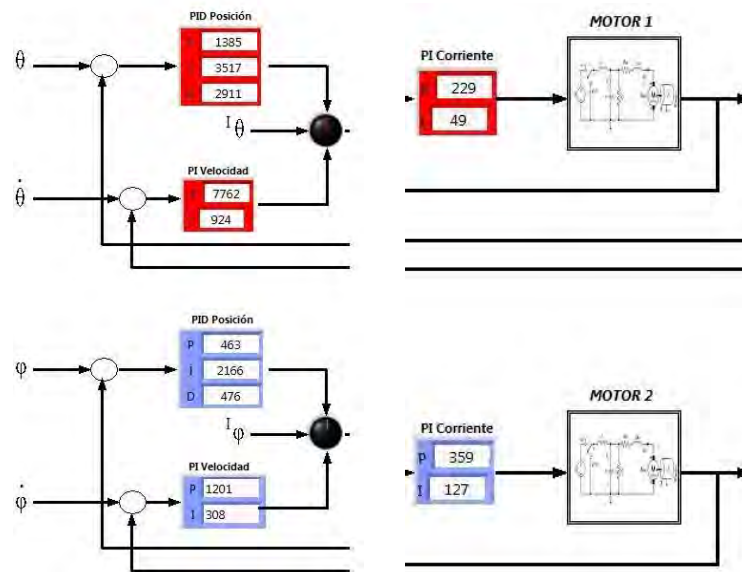


Figura 4.9: Panel frontal del controlador principal (rojo) y secundario (azul), donde se pueden observar los PID para posición, velocidad y corriente.

El diagrama de bloques asociado al control PID previamente mencionado, se puede observar en siguiente figura 4.10.

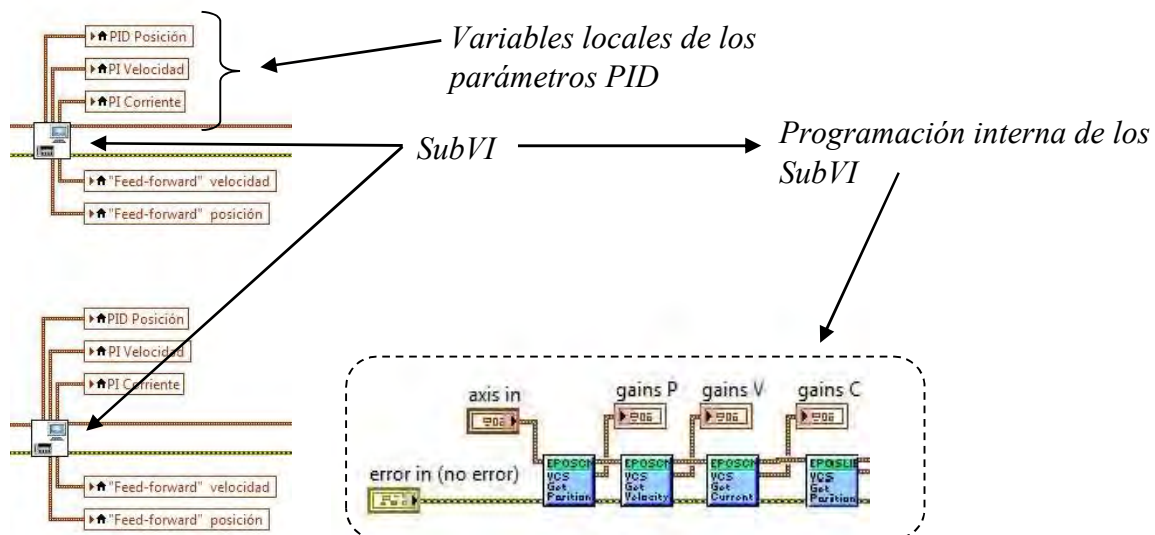


Figura 4.10: Diagrama de bloques asociado a los PID de control en posición, velocidad y corriente.

Se crearon dos *subVI* (uno para cada controlador), los cuales, reciben a través de variables locales los parámetros introducidos por el operador. Éstos, internamente, serán configurados de manera individual, siendo los *VI*s denominados *VCS Get Position Regulator Gain*, *VCS Get Velocity Regulator Gain* y *VCS Get Current Regulator Gain*.

los encargados de tratar en última instancia los valores P (proporcional), I (integral) y D (derivativo) de regulador de control asociado al motor principal o secundario.

4.4.1.3 Parámetros de prealimentación

Éstos son denominados técnicamente como parámetros “*feed-forward*” en posición, o bien en velocidad en la pantalla del controlador, como se puede observar en la figura 4.12. Su función principal radica en responder ante altas inercias de la carga y/o aceleraciones en aplicaciones con carga considerable dependiente de la velocidad, para posteriormente, realizar un control para compensar dichas inercias. Por tanto, el objetivo final de este parámetro, es no permitir la modificación de la salida del sistema, previniendo las variaciones y compensando antes de producirse un cambio.

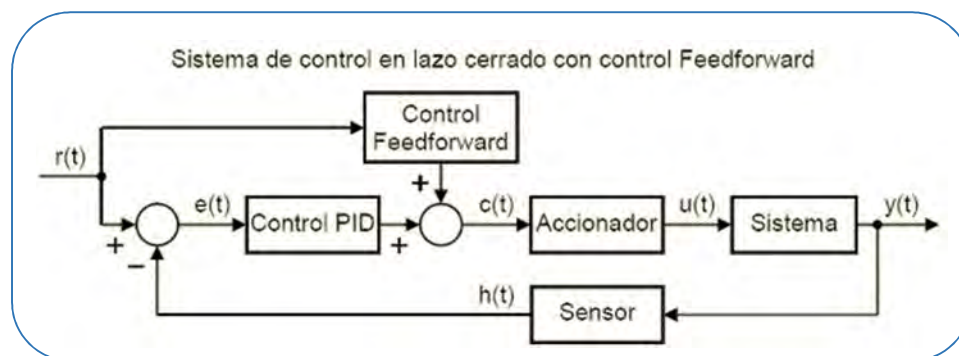


Figura 4.11: Diagrama de control en lazo cerrado con feed-forward.

Este control *feed-forward* combinado con el control PID, suma las ventajas de ambos sistemas. La unión de los dos controles mejora significativamente el desempeño del sistema, ya que el rozamiento proporcional a la velocidad puede ser medido antes de que afecte a la salida del proceso. Gracias a esto, el controlador PID encontrará un error menor que corregir (Figura 4.11).

Otra gran ventaja de unir los dos controles consiste en que el sistema se hace más tolerante ante fallos. En el caso de que no llegue la señal del sensor al sistema, el control realimentado (PID) no podrá funcionar. En este caso, el control *feed-forward* conseguirá una salida suficiente para que el sistema siga funcionando.

Además, es más fácil reducir con el control *feed-forward*, el error permanente del sistema a un pequeño porcentaje del error que tendría el sistema sin este control. Esta reducción del error permanente, hace en ocasiones innecesaria la acción Integral. Todo esto redundará en una mayor estabilidad del sistema, menor error, mayor rapidez de respuesta a perturbaciones y comportamiento más robusto ante cambios del sistema controlado.

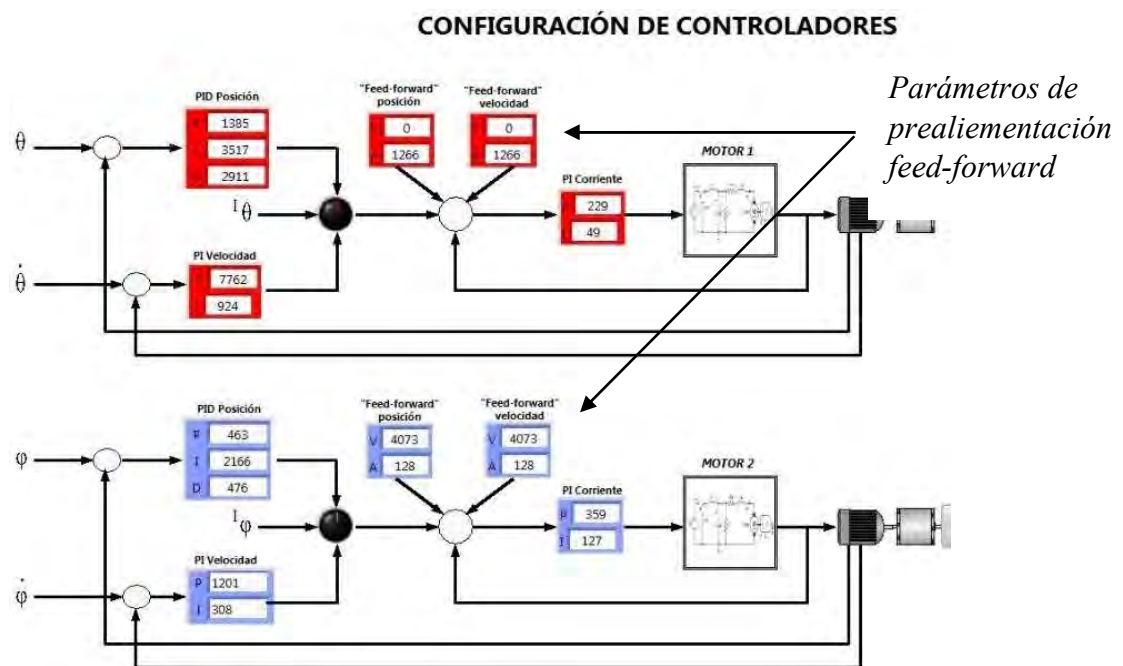


Figura 4.12: Panel frontal de la configuración de controladores, donde se observan los parámetros feed-forward a introducir por el operador.

Estos parámetros de prealimentación introducidos por el operador, serán llevados a los correspondientes *subVI* para ejercer el control de manera práctica, tal y como se observa en la figura 4.13.

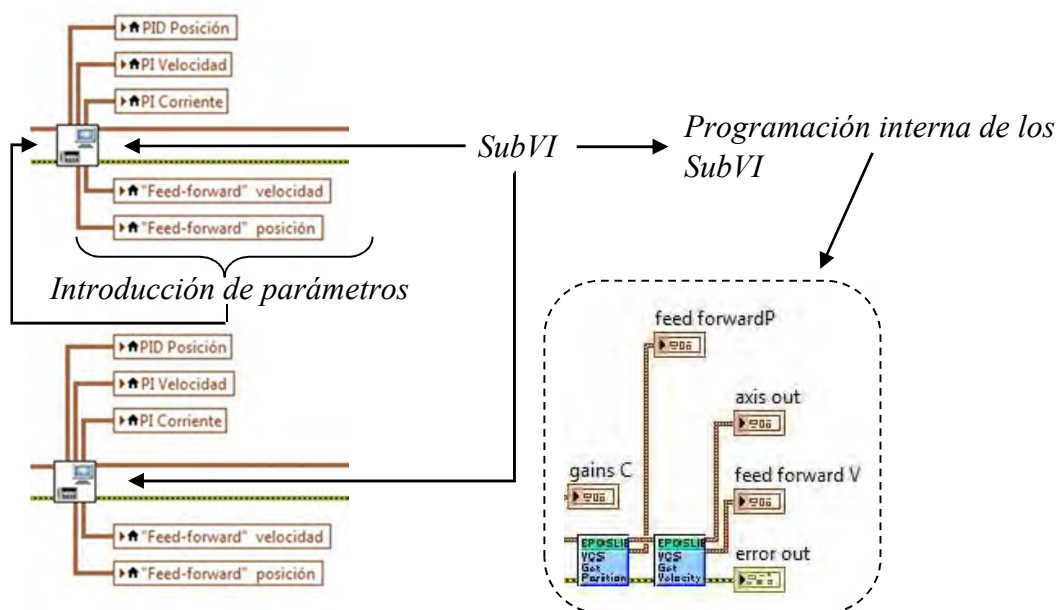


Figura 4.13: Diagrama de bloques asociado a la introducción de parámetros feed-forward.

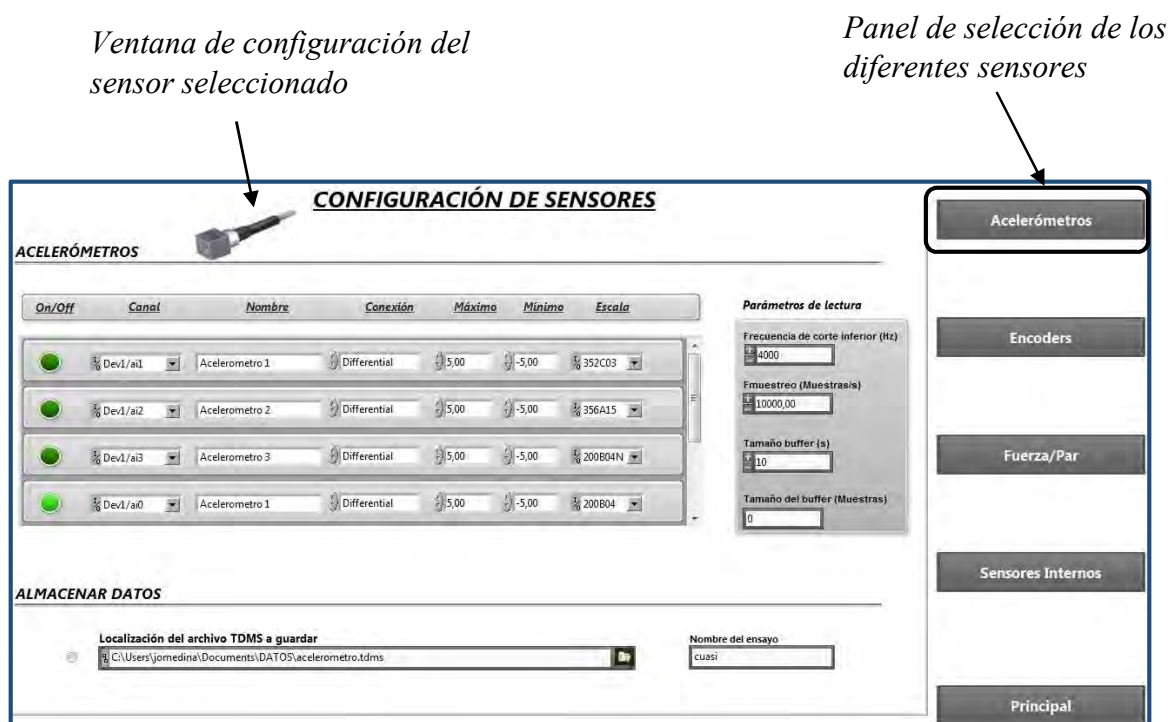
Los *VI*s denominados *VCS Get Position Regulator Feed Forward* y *VCS Get Velocity Regulator Feed Forward*, serán los encargados de tratar los valores *feed-forward* introducidos por el operador previamente.

4.4.2 Sensores

La programación *software* de los diferentes sensores, es una de las partes más complejas del programa debido a la diversidad de equipos utilizados para la medición de diferentes valores relacionados con la aceleración, la posición o la fuerza.

Cada sensor cuenta con su propia naturaleza de funcionamiento, así como con su propio tratamiento de datos y generación de señales. A todo ello, hay que sumarle la necesidad de dar opción al operador para añadir cuantos sensores considere necesario, con su consiguiente configuración, tratamiento de señal, guardado de datos e integración en el programa. Es por ello que a continuación se dará una visión generalista de la programación implementada.

El operador podrá acceder a la pantalla de configuración de sensores (Figura 4.14), donde podrá seleccionar cuál de ellos desea configurar, encaminándosele de manera automática a través de diferentes ventanas en función de la selección.



(a)

ENCODERS

On/Off	Canal	Nombre	Unidades	Pulsos/rev	Modo	Inicial	HZ	VIZ	FIZ
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev1/ctrl0	Encoder1	Degrees	25600	X4	0	0	0	A High B High
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev1/ctrl1	Encoder2	Degrees	22500	X4	0	0	0	A High B High
<input type="checkbox"/>	Dev1/ctrl1	Encoder2	Degrees	45000	X4	0	0	0	A High B High

Parámetros de lectura

Generador de frecuencia: Dev1/Freqout
Fuente de reloj para encoder: /Dev1/FrequencyOutput
Frecuencia (Hz): 6250.00
Tamaño buffer (s): 10
Tamaño buffer (muestras): 0
Fmuestreo (muestras/s): 6250.00

ALMACENAR DATOS

Localización del archivo TDMS a guardar - Encoder 1: C:\Users\jomedina\Documents\DATOS\encoder1.tdms
Nombre del ensayo (Encoder 1): Cuasi

Localización del archivo TDMS a guardar - Encoder 2: C:\Users\jomedina\Documents\DATOS\encoder2.tdms
Nombre del ensayo (Encoder 2): prueba1

Principal

(b)

FUERZA / PAR

Filtro: 1

ESCALA

	minima	maxima
FX	76	302
FY	76	302
FZ	212	847
MX	53	211
MY	52	205
MZ	70	279

Reset Offsets

Aplicar Escalas

ALMACENAR DATOS

Localización del archivo TDMS a guardar: C:\Users\Grupo VSA\Desktop\test fuerza.tdms

Principal

(c)

INTERNOS MOTOR 1

Guardado de sensores internos motor 1: C:\Users\jomedina\Documents\DATOS\internos_1.tdms
Nombre del grupo: Internos 1

INTERNOS MOTOR 2

Guardado de sensores internos motor 2: C:\Users\jomedina\Desktop\temporal\TDMS\internos_2.tdms
Nombre del grupo: Internos 2

Principal

(d)

Figura 4.14: Pantallas frontales para la configuración de sensores: (a) Configuración de acelerómetros, (b) Configuración de encoders, (c) Configuración de fuerza/par y (d) Configuración de sensores intrínsecos.

Los diferentes parámetros a configurar dependen del tipo de sensor, definiéndose a continuación en las tablas XVII, XVIII, XIX, XX los principales, para cada caso:

- Acelerómetros

Tabla XVII: Parámetros para la configuración de acelerómetros.

Parámetro	Descripción
On/Off	Selección de activación/apagado del acelerómetro.
Canal	Canal de conexión al DAQ para tratar la señal.
Nombre	Nombre que se asigna al canal.
Conexión	Tipo de conexión al DAQ: <ul style="list-style-type: none"> - RSE (<i>referenced signal ended</i>): con referencia a tierra. - NRSE (<i>nonreferenced signal ended</i>): con referencia que no es tierra. - Diferencial: entre dos terminales. - Pseudodiferencial: combinación de modo diferencial y RSE.
<i>Nota: Para más detalle, referirse a DAQ M Series User Manual, Cap. 4 Analog Input, 4 Ground reference settings.</i>	
Máximo	Máximo valor de la señal a medir.
Mínimo	Mínimo valor de la señal a medir.
Escala	Selección la escala adecuada para cada sensor. Permite obtener lecturas directas.
Guardado de datos	Posibilidad de guardar los datos recogidos de aceleración en un archivo TDMS seleccionable.

- Encoders

Tabla XVIII: Parámetros para la configuración de encoders.

Parámetro	Descripción
On/Off	Selección de activación/apagado del encoder.
Canal	Canal de conexión al DAQ para tratar la señal.
Nombre	Nombre que se asigna al canal.
Unidades	Unidad de medida.
Pulsos/rev	Pulsos por revolución que es capaz de medir el encoder.



Modo	<p>Especifica el modo de conteo e interpretación de los pulsos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Two Pulse Counting</i>: Se produce un incremento en la cuenta al detectarse flancos de subida de la señal A. Se produce un decremento en la cuenta al detectarse flancos de subida de la señal B. Si selecciona este modo, el índice de fase Z será ignorado. - <i>X1</i>: Si la señal A lidera a la señal B, se cuentan los flancos de subida de la señal A. Si la señal B lidera a la señal A, se cuentan los flancos descendentes de la señal A. - <i>X2</i>: Se cuentan los flancos ascendentes y descendentes de la señal A. - <i>X4</i>: Se cuentan los flancos ascendentes y descendentes de ambas señales (A y B). <p><i>Nota: Para más detalle, referirse a LabVIEW Help, Counter Input: Position: Decoding Type Property.</i></p>
Inicial	Ángulo con el que inicia la lectura del encoder.
HZ	<p>Señal Z para indexación, que produce un pulso en posiciones fijas que se pueden utilizar para la determinación precisa de una posición de referencia. Por ejemplo, si el índice Z es 45° para un codificador angular, el codificador envía un pulso en el terminal Z de entrada cada vez que el codificador se gira a la marca de 45°.</p> <p><i>Nota: Para más detalle, referirse a LabVIEW Help, Counter Input: Position: Z Index Enable Property.</i></p>
VIZ	<p>Especifica el valor con el que se reinicia la medida cuando la señal Z es alta y las señales A y B se encuentran en el estado especificado en la casilla “modo” del HMI de configuración.</p> <p><i>Nota: Para más detalle, referirse a LabVIEW Help, CI Position Angular Encoder.</i></p>
FIZ	<p>Especifica los estados en los que se iniciaran las señales A y B cuando la señal Z sea alta para reiniciar:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>A High B High</i>: Reseteo de la medida cuando la señal A y B son altas. - <i>A High B Low</i>: Reseteo de la medida cuando la señal A es alta y B es baja. - <i>A Low B High</i>: Reseteo de la medida cuando la señal A es baja y B es alta. - <i>A Low B Low</i>: Reseteo de la medida cuando la señal A y B son bajas. <p><i>Nota: Para más detalle, referirse a LabVIEW Help, CI Position Angular Encoder.</i></p>
Guardado de datos	Posibilidad de guardar los datos recogidos de posición en un archivo TDMS seleccionable.

- Fuerza/par

Tabla XIX: Parámetros para la configuración de fuerza/par.

Parámetro	Descripción
Filtro	Selección del filtro paso bajo a usar: <ul style="list-style-type: none"> - 1: 2000 Hz - 2: 500 Hz - 3: 125 Hz - 4: 31,25 Hz - 5: 7,81Hz
Escala	Escala aplicada a los diferentes valores de fuerza y momento.
Aplicar escalas	Aplicación de las escalas seleccionadas.
Reset offsets	Reinicio de los <i>offsets</i> leídos previamente por el sensor.
Guardado de datos	Posibilidad de guardar los datos recogidos de fuerza y par en un archivo TDMS seleccionable.

- Sensores internos

Tabla XX: Parámetros para la configuración de los sensores intrínsecos.

Parámetro	Descripción
Guardado de datos	Posibilidad de guardar los datos recogidos de posición, velocidad y corriente de cada motor en un archivo TDMS seleccionable.
Nombre	Nombre asignado al guardado de los datos.

4.4.3 Carga desde archivo

La carga desde archivo, permite al operador realizar un *upload* de una configuración de EPOS2 previa a través de dos métodos, según sus necesidades. Ello, le permite ahorrar tiempo en el caso de que ya contará con configuraciones anteriormente guardadas, no teniendo que introducir los parámetros de configuración de motores, controladores, etc. de nuevo, como en el caso del modo de carga manual. Este modo de carga simplificada, se muestra al operador a través de la pantalla mostrada en la figura 4.15.



Figura 4.15: Pantalla frontal mostrada al operador para la elección del modo de carga desde archivo para la configuración de los EPOS2.

Donde ambas posibilidades de carga mostradas, se definen a continuación:

- Carga separada: Cada dispositivo se cargará desde la ruta seleccionada, de manera individualizada. Para ello, se debe disponer de los archivos *.pjm* correctamente configurados para el EPOS2 seleccionado.
- Carga conjunta: Ambos dispositivos, serán cargados a la vez, desde un mismo archivo, pero con parámetros individualizados. Para ello, se debe disponer del archivo *.pjm* correctamente configurado para los dos EPOS2.

La programación desarrollada para posibilitar esta carga desde archivo, es relativamente sencilla. Un sistema de bucles condicionales *if* permiten introducir el tipo de carga dependiendo de la selección por parte del operador. Posteriormente, a través de los *VI Import Parameter from File*, se realiza el *upload* de la configuración guardada en el archivo seleccionado por el operador (Figuras 4.16 y 4.17).

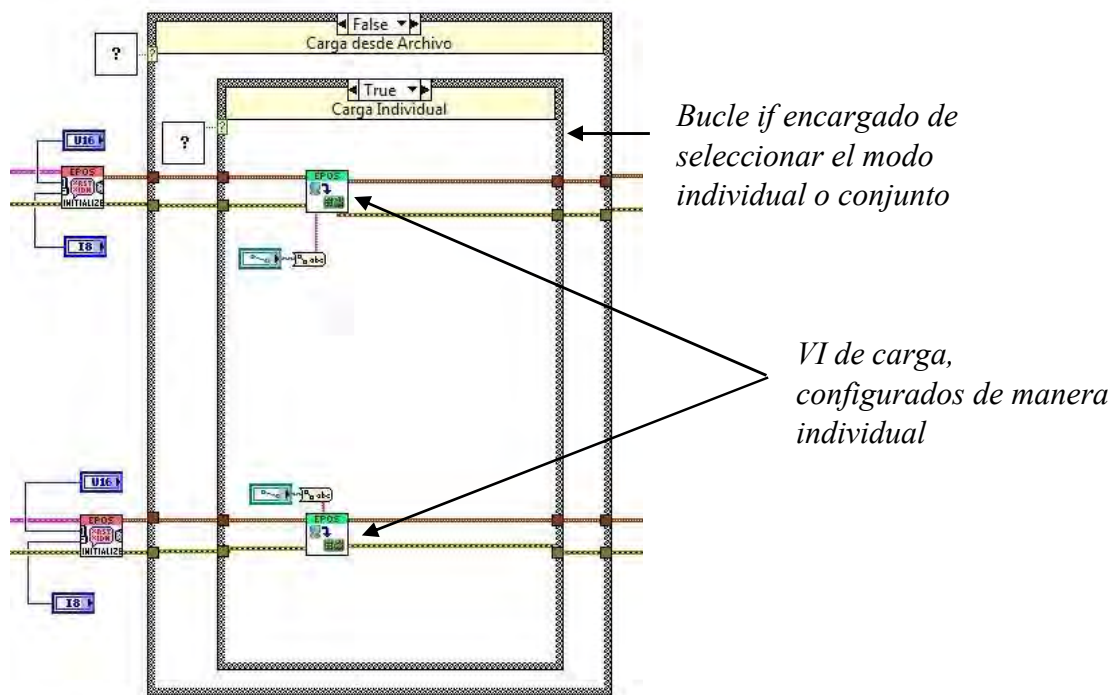


Figura 4.16: Diagrama de bloques para la carga desde archivo individual.

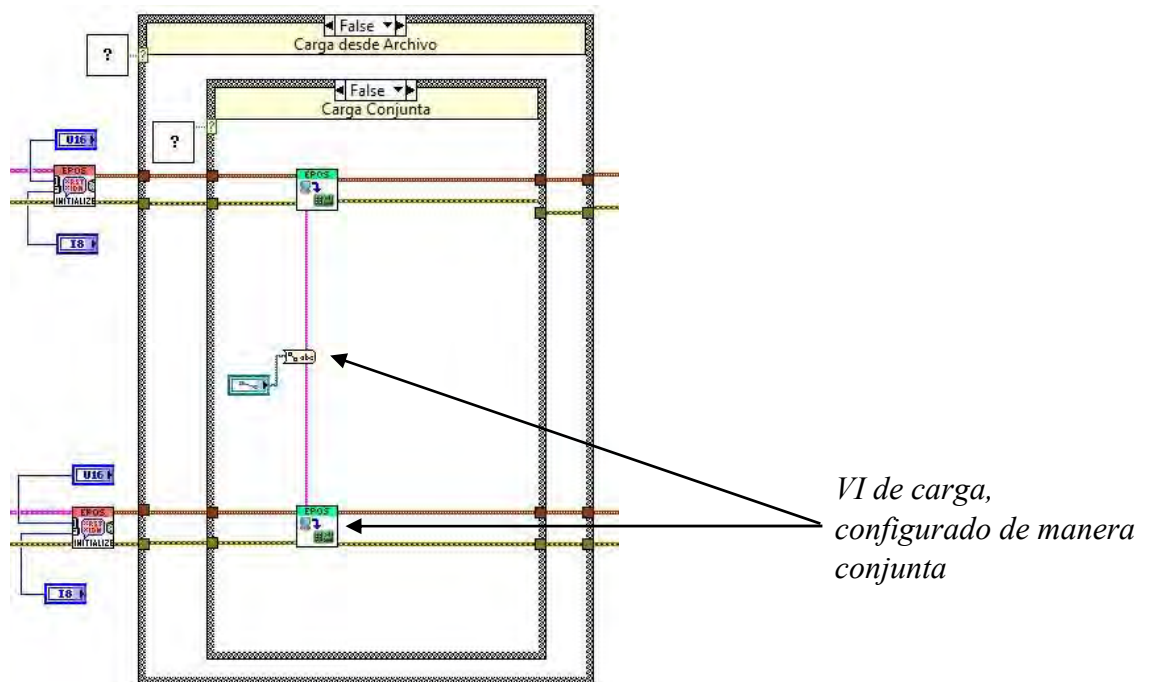


Figura 4.17: Diagrama de bloques para la carga desde archivo conjunta.

La imagen que se ilustra a continuación (Figura 4.18), muestra el modo de carga manual, el cual, implica que el sistema cargará los parámetros introducidos previamente por el operador a través del HMI para configurar los EPOS2. Nótese la diferencia en la

complejidad de programación entre ambas opciones (carga desde archivo y carga manual).

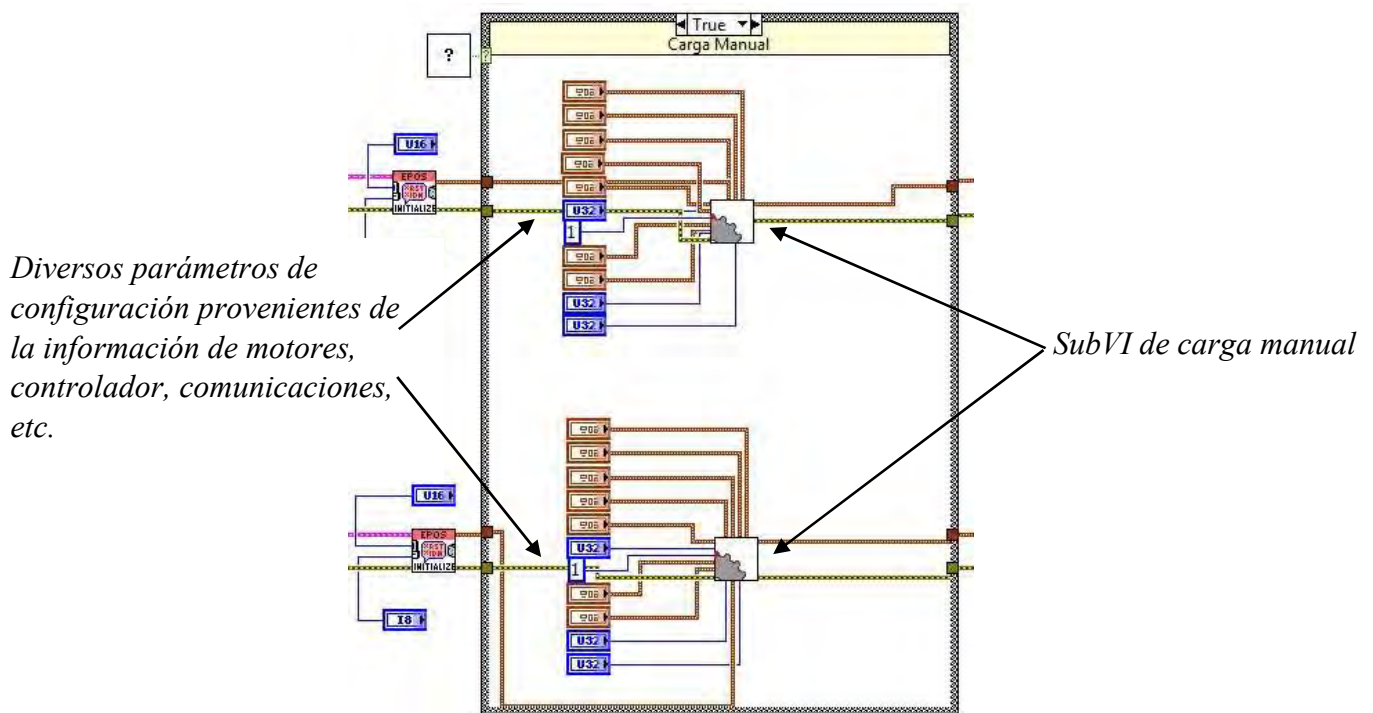


Figura 4.18: Diagrama de bloques para la carga manual.

4.5 Adquisición de datos

La computadora recibe en primera instancia la información virgen a través del dispositivo DAQ. Gracias a la programación implementada, dicha información es presentada y manipulada en una forma que se pueda comprender. Además, también se controla el propio dispositivo DAQ, indicándole cuando y de qué canales adquirir datos. De esta manera, se consigue una simple interfaz de programación para controlar las entradas analógicas, salidas analógicas, E/S digitales y contadores/temporizadores en las diferentes funciones del dispositivo *hardware* DAQ.

Se utilizaron principalmente *VI*s *DAQmx* que cuentan con funciones y herramientas de desarrollo para controlar los dispositivos de medida. *DAQmx* proporciona un interfaz de usuario y un sistema de herramientas para programar y configurar el dispositivo DAQ utilizado. Debe señalarse además, que estos *VI*s pueden manejar un número ilimitado de tareas o hilos en paralelo; aunque en muchos casos, el número máximo está limitado por el *hardware*. En el *software* desarrollado, el trabajo se efectuará a cuatro hilos (sensores intrínsecos del motor principal, sensores intrínsecos del motor secundario, acelerómetros y encoders) con tasas de adquisiciones variables y seleccionables (con la excepción de los sensores intrínsecos, que la realizarán a la misma tasa que el lazo de control).

DAQmx también destaca por la integración directa para el registro de datos a través del formato TDMS (*Test Data Exchange Stream*). Éste es recomendado por el fabricante, ya que constituye la forma más sencilla de transmitir y almacenar los datos de las mediciones adquiridas al disco duro con el mejor desempeño, usabilidad y reutilización (Figura 4.19). Este tipo de archivos, fue el utilizado para registrar y almacenar los datos procedentes de todos los instrumentos (aceleración, posición, velocidad y corriente).

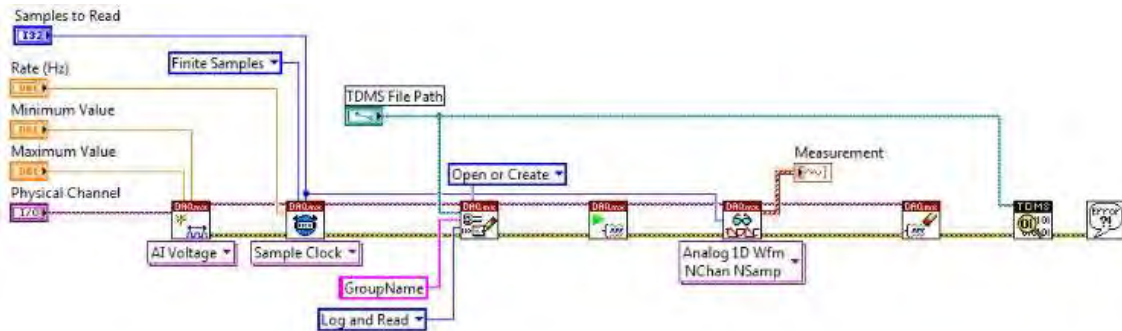


Figura 4.19: Ejemplo de un VI DAQmx que permite a los usuarios configurar un registro de datos a un archivo TDMS incluso antes de iniciar la tarea.

Se destaca igualmente, el uso del VI *DAQmx Read* como herramienta específica, capaz de leer muestreos desde la tarea de adquisición especificada. Las diferentes instancias de la función toman en consideración el tipo de adquisición (analógica, digital o contador), el número de canales virtuales, el número de muestreos y el tipo de datos que serán seleccionados.

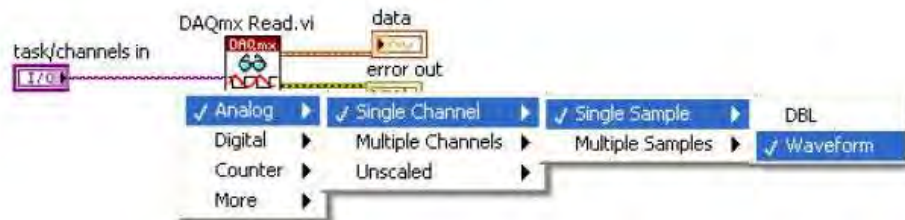


Figura 4.20: Ejemplo de programación para la lectura de una entrada analógica en el DAQ.

Un ejemplo de programación del *DAQmx Read* se puede ver en la figura 4.20, donde en el primer menú se elige el tipo de entrada; en el segundo, se determina el número de canales o si los datos están sin escalar; y en el tercero, se selecciona el número de muestras a leer. Por último, en el cuarto menú, se selecciona el modo en que se van a enviar los datos.

La siguiente figura (Figura 4.21) muestra cuatro ejemplos de diferentes instancias de *DAQmx Read VI*.

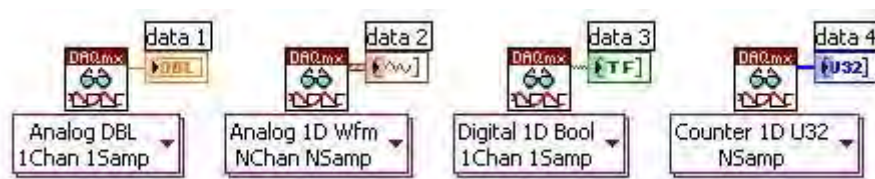


Figura 4.21: Ejemplo de DAQmx Read para diferentes instancias: data1) DBL, data2) Waveform, data3) Boolean y data4) Unsigned.

A continuación, se destacan los principales parámetros a tener en cuenta cuando se usa el VI DAQmx Read (Tablas XXI y XXII):

Tabla XXI: Parámetros de waveform al usar DAQmx Read.

Parámetros de Waveform	Descripción
Y	Un array 1D (dimensión) de puntos de datos numéricos, que puede ser un simple punto o un waveform dependiendo de la operación. La representación del array 1D es DBL (double-precision).
t0	Un valor escalar que representa el tiempo de acuerdo con el reloj del sistema, cuando se adquiere el primer punto en el array Y. También llamado tiempo de inicio.
Δt	Valor escalar que representa el tiempo entre los puntos de datos del array Y.
Atributos	Un string que permite empaquetar otra información con el waveform, como puede ser el número de dispositivo o número de canal.

Tabla XXII: Parámetros de muestras al usar DAQmx Read.

Parámetros de muestreo	Descripción
Muestras por canal por segundo	Número de muestras adquiridas por el canal cada segundo.
Sample Clock	Un tren de pulsos utilizado para comenzar con la adquisición de muestras. Cada vez que el Sample Clock produce un pulso, se adquiere una muestra por canal.
AI Convert Clock	Un tren de pulsos utilizado para comenzar la conversión A/D (analógica/digital).
Sample Duration	El tiempo en el que se prolonga una muestra. La fórmula utilizada para el cálculo de la duración de la muestra es: $\text{Sample Duration} = (\text{nº de canales} - 1) \cdot \text{AI Convert Clock}$

Otro elemento importante de un sistema de medida de entrada analógica o de salida analógica es la frecuencia en la cual el dispositivo de medida muestrea una señal

entrante o genera la señal de salida. La frecuencia de muestreo en el *DAQmx*, determina cuantas veces ocurre la conversión A/D o D/A. Una frecuencia de muestreo rápida de la entrada adquiere más puntos en un tiempo dado y puede formar una mejor representación de la señal original que una frecuencia de muestreo lenta. Así pues, en una señal de 1 Hz con 1000 puntos/ciclo a una tasa de muestreo de 1000 muestras/s produce una representación mucho más exacta que usando una frecuencia de 10 muestras/s. Un ejemplo de este concepto, se observa en la figura 4.22.

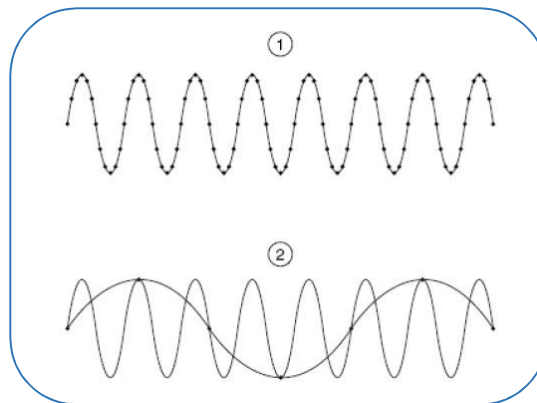


Figura 4.22: Ejemplo de frecuencia de muestreo: 1) Señal salida que se corresponde con la señal de entrada mediante una correcta selección muestras/s, y 2) Señal salida que no se corresponde con la señal de entrada mediante una incorrecta selección muestras/s.

Igualmente importante es definir correctamente los *VI*s de reloj (*timing*) y *buffer*. En el siguiente ejemplo (Figura 4.23), se muestra la utilización de *buffer*, *timing* y *DAQmx Read*.

El *VI DAQmx Task Timing* (éste configura la velocidad de muestreo, el número de muestras a adquirir o generar y crear un buffer cuando sea necesario) ajusta el *task/channel*, *timing*, *samples per channel* (tamaño del *buffer*). Luego, el *VI DAQmx Start Task* comienza la adquisición. Entonces, el programa espera al *VI DAQmx Read* hasta que el *buffer* este lleno. Cuando el *buffer* este lleno, el *VI DAQmx Read* devuelve el dato al *buffer*, el *VI DAQmx Stop Task* finaliza la adquisición y el *VI Simple Error Handler* muestra el error.

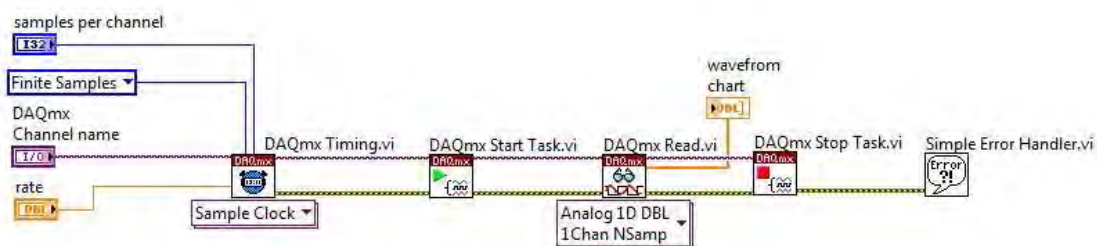


Figura 4.23: Ejemplo de completo programación de DAQ para lectura, utilizando *timing* y *buffer*.

Recapitulando, el proceso conceptual seguido para la adquisición de datos se observa en la figura 4.24.

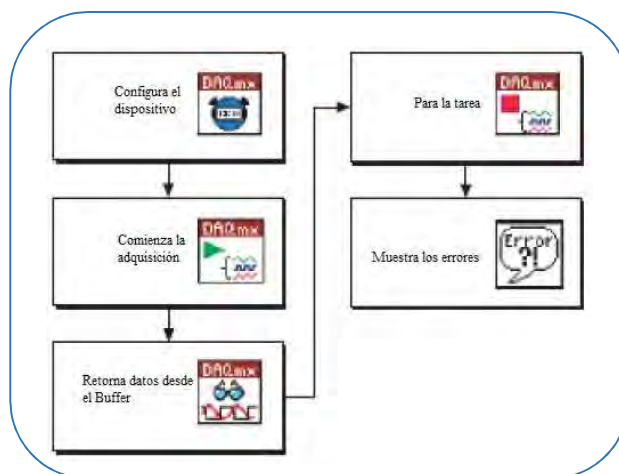


Figura 4.24: Esquema conceptual de la programación de DAQ para lectura.

Prácticamente la totalidad de estos *VI* fueron utilizados en la configuración y adquisición de datos de todos los tipos de sensores. Referirse al apartado 4.4.2 - *Sensores* para visualizar su uso en la programación implementada.

4.6 Acciones y movimientos

A continuación, se describe la parte central y más compleja del diseño *software* para el control de los prototipos flexibles con rigidez variable. Los siguientes modos de operación, describen los diferentes tipos de comportamientos que el actuador es capaz de ejecutar para realizar los diferentes ensayos. El operador accederá a ellos a través de la pantalla “Acciones y Movimientos”, mostrándose automáticamente el modo de operación previamente seleccionado y cargado en la pantalla de “Configuración de Controladores”.

4.6.1 Motor de posición

Los modos de operación a continuación detallados, están habilitados para el motor principal (de posición) del actuador.

4.6.1.1 Profile Position Mode (PPM)

Este modo permite posicionar el eje del motor desde un punto A hasta un punto B mediante la generación de una trayectoria controlada. Dicho posicionamiento puede ejecutarse con respecto al origen absoluto del eje o con respecto a la posición actual

(relativo). Una modificación de los puntos inicial y final en el movimiento, originarán un ajuste de la trayectoria para adaptar los parámetros (aceleración y velocidad) al valor más óptimo posible.

El operador, podrá configurar este modo de operación basado en posición, mediante la interfaz mostrada en la figura 4.25. En ella se puede observar cuatro zonas bien diferenciadas: monitorización de la operación, configuración de los parámetros del modo de operación, posición objetivo y control *start/stop*.

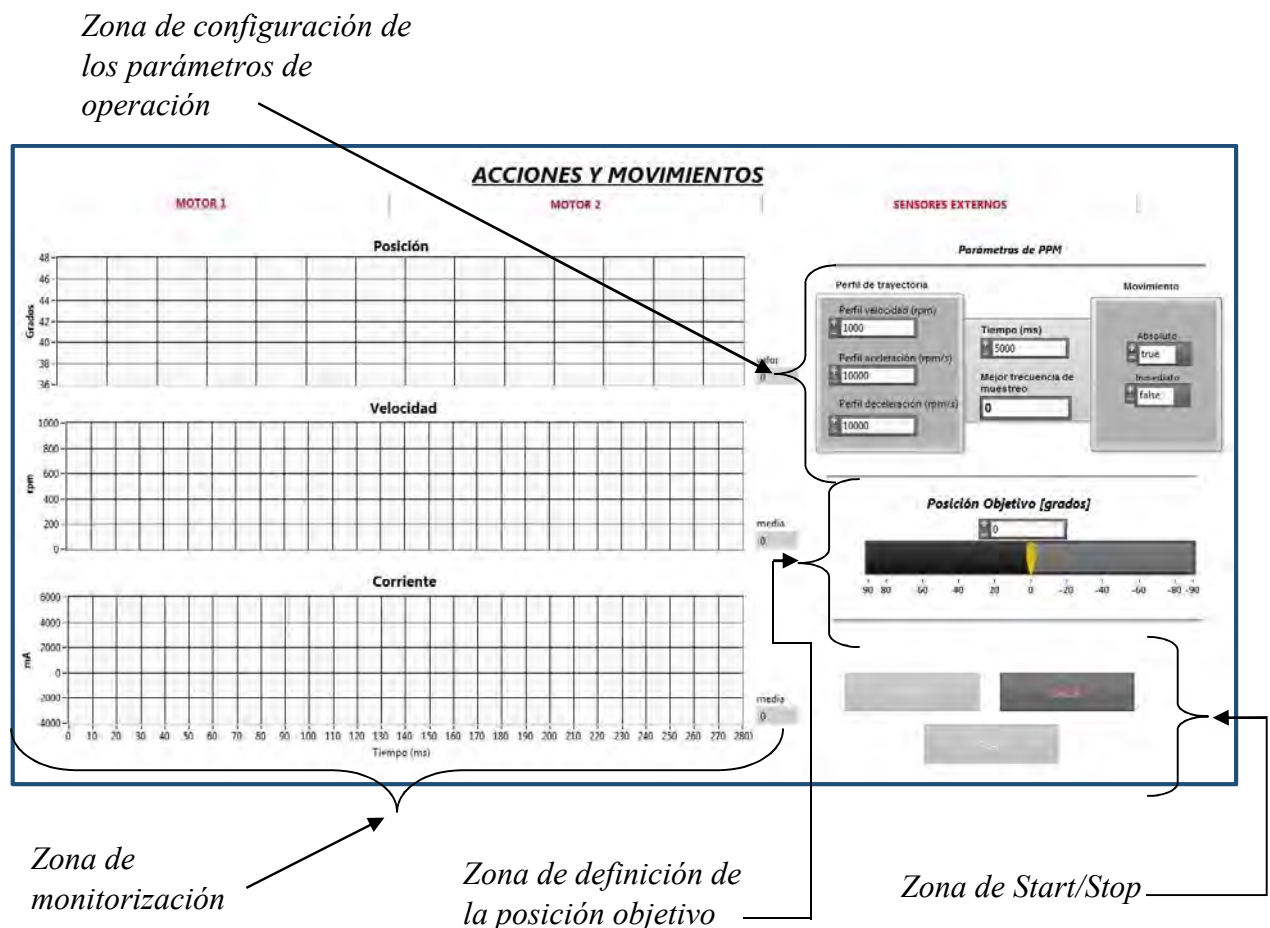


Figura 4.25: Panel frontal para la ejecución en modo PPM.

La zona de monitorización está diseñada para mantener la visualización de datos referentes a la posición, velocidad y corriente registradas en el motor. Mediante la barra de progreso horizontal situada en la zona de posición objetivo, se podrá seleccionar de una manera sencilla, la posición deseada a alcanzar por el motor mediante la trayectoria generada por el EPOS2. Por último, en la zona de configuración de los parámetros de este modo de operación, el operador encontrará los siguientes campos a modelar (tabla XXIII):



Tabla XXIII: Parámetros de configuración del modo PPM.

Parámetros PPM	Descripción
Perfil de velocidad	Valor de la velocidad (en rpm) alcanzada al final de la rampa de aceleración durante el movimiento.
Perfil de aceleración	Define la rampa de aceleración (en rpm/s) para el movimiento.
Perfil de deceleración	Define la rampa de deceleración (en rpm/s) para el movimiento.
Tiempo	Valor de tiempo (en ms) del que dispone el actuador para alcanzar el siguiente punto de referencia en la trayectoria generada por EPOS2.
Mejor frecuencia de muestreo	Indicador de la frecuencia a la que se muestreará el movimiento (velocidad y aceleración) para optimizar los recursos.
Absoluto	Selección del tipo de referencia: <ul style="list-style-type: none"> - <i>True</i>: absoluta con respecto al eje del motor. - <i>False</i>: relativa con respecto a la posición actual.
Inmediato	<ul style="list-style-type: none"> - <i>True</i>: cambio instantáneo de la posición objetivo nueva marcada por el operador (no se esperará a terminar el movimiento previo). - <i>False</i>: cambio no instantáneo de la posición objetivo nueva marcada por el operador (se esperará a terminar el movimiento previo).

Toda esta funcionalidad de movimiento basado en control de posición con generación de trayectoria, se implementó a través de la programación ilustrada en la figuras 4.26 y 4.27.

En ella, se puede observar como mediante el *VI Enable Axis*, se desbloquea el eje del motor para habilitar e iniciar el movimiento. Posteriormente se define el modo de posición; destacándose el *subVI PPM*, en cuyo interior, se implementa el modo de seguimiento en posición a través de trayectoria mediante los *VI VCS Set Position Profile*, *VCS Move to Position* y *VCS Wait for Target Reached*. Éstos intercambian información para definir la posición a alcanzar y el tiempo que se establece para realizar dicho movimiento. Estos *VI*s, junto con el apoyo de otros componentes de programación diferentes que no se detallarán (relojes, temporizadores, bucles, operadores lógicos...), conforman el modo de operación PPM.

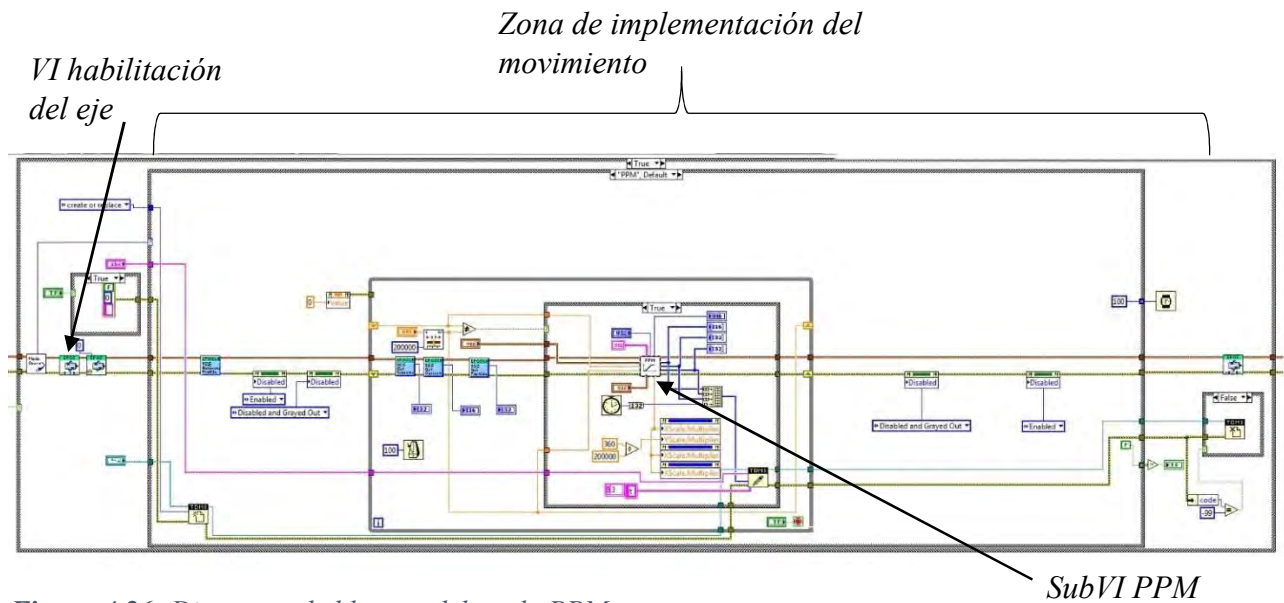


Figura 4.26: Diagrama de bloques del modo PPM.

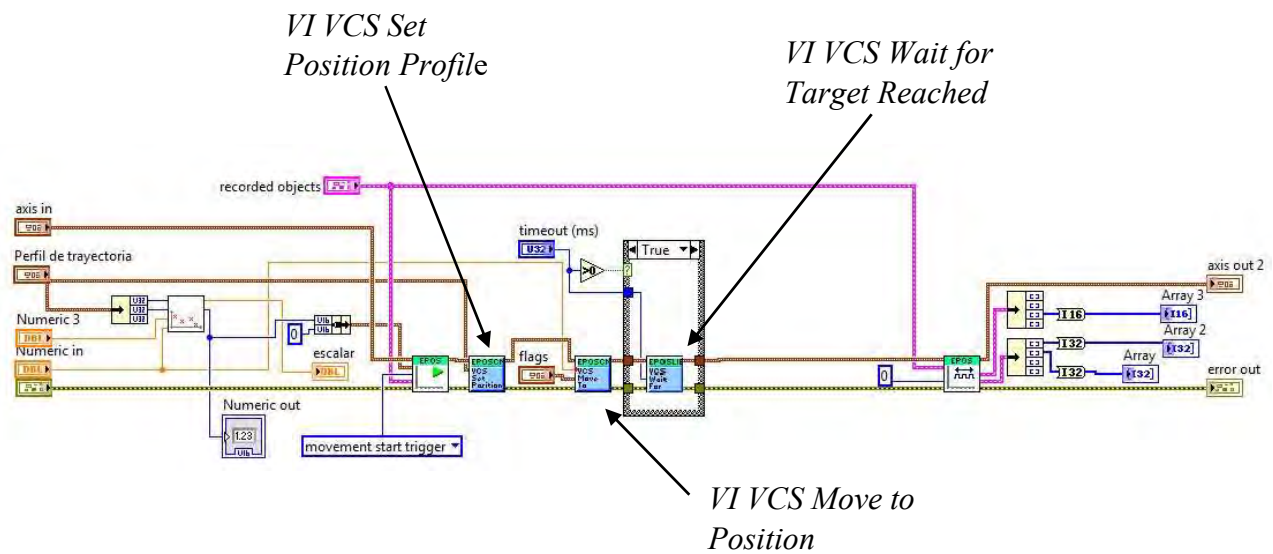


Figura 4.27: Diagrama de bloques interno del subVI PPM.

4.6.1.2 Homing Mode (HM)

Este modo permite referenciar el motor con respecto a una posición mecánica previamente establecida (*home*). Existen quince métodos diferentes disponibles para buscar la posición de referencia, a elección del operador.

A través del HMI mostrado en la figura 4.28, se puede configurar y monitorizar el modo HM, siguiendo el mismo principio que PPM, en este caso de tres zonas diferenciadas.

Zona de configuración de los parámetros de operación

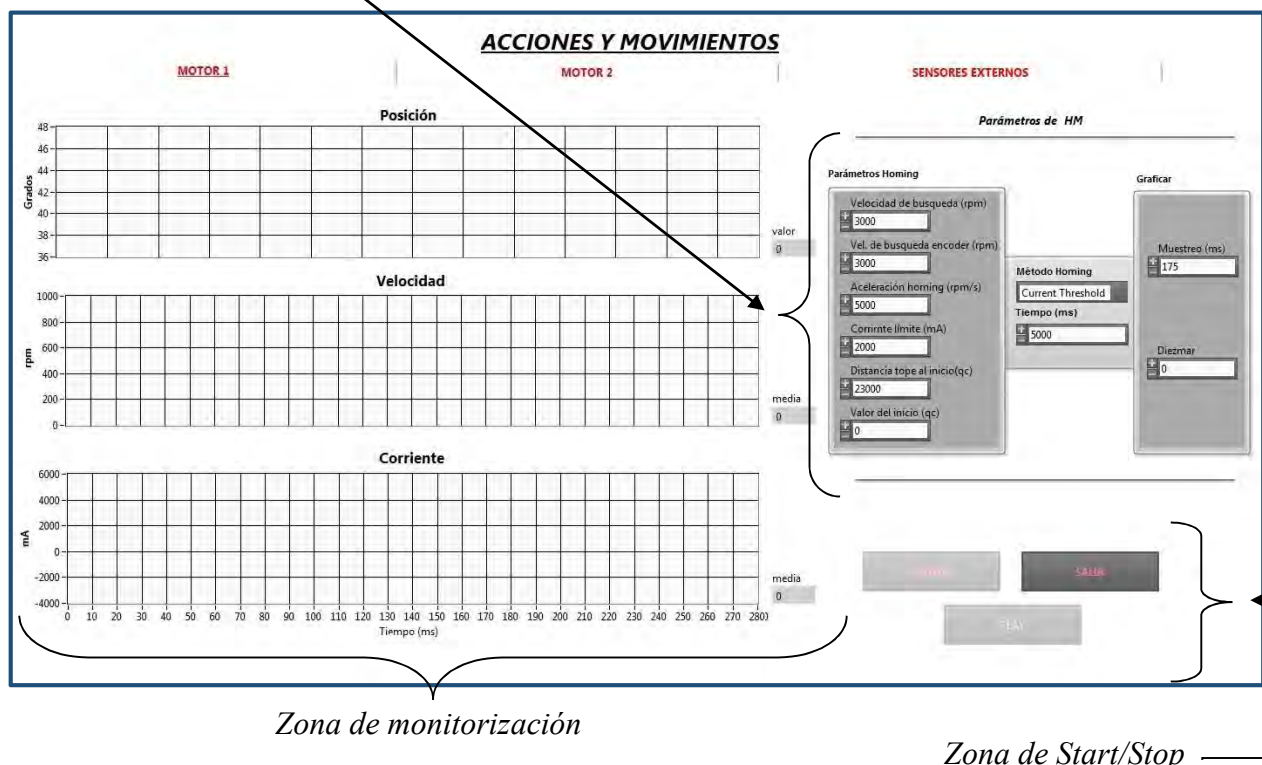


Figura 4.28: Panel frontal para la ejecución en modo HM.

Los parámetros que el operador debe configurar y tener en consideración en este modo, se describen en la tabla XXIV.

Tabla XXIV: Parámetros de configuración del modo HM.

Parámetros HM	Descripción
Velocidad de búsqueda	Especifica la velocidad (en rpm) utilizada para encontrar la referencia mecánica del eje (<i>home</i>).
Velocidad de búsqueda de encoder	Especifica la velocidad (en rpm) utilizada para encontrar el pulso cero (<i>index</i>) del encoder (sólo operativo para los métodos <i>homing</i> que incluyan “ <i>Index</i> ”).
Aceleración homing	Especifica la rampa de aceleración (en rpm/s) para alcanzar la velocidad de búsqueda definida.
Corriente límite	Especifica el valor de corriente (en mA) que inicia la velocidad de búsqueda del encoder.

Distancia tope al inicio	Valor de posición (en qc), que se desplazará la referencia de posición del sistema ($qc=0$) tras haber realizado la búsqueda mecánica del eje.
Valor de inicio	Nuevo valor de posición (en qc) con el que se definirá la referencia de posición del sistema ($qc=0$) tras haber realizado la búsqueda mecánica del eje.
Método homing	Método específico para buscar la posición de referencia. <i>Nota: Para más detalle, referirse al apartado 4.4.1.1 - Modo de Operación, para conocer los diversos métodos.</i>
Tiempo	Tiempo máximo (en ms) para encontrar la referencia mecánica del eje (<i>home</i>) y/o la referencia de posición del sistema.
Muestreo	Indicador de la frecuencia (en ms) a la que se muestreará el movimiento (velocidad y aceleración) para optimizar los recursos.
Diezmar	Diezmar población de muestras en el buffer.

Nota: Para más detalle de este modo de operación, referirse a Maxon Firmware Specification, cap. 4 Operating Modes, 4.5 Homing Mode (HMM).

Desde el punto de vista de la programación, se debe destacar el uso del *subVI Find Home*, que constituye el centro de este modo de operación. En su interior, destacan los *VI*s *VCS Activate Homing Mode*, *VCS Set Homing Parameter*, *VCS Set Enable State*, *VCS Find Home* y *VCS Wait for Homing Attained*. Los cuales, tienen como tarea activar dicho modo de operación, definir los parámetros de su configuración, habilitar el dispositivo EPOS2, buscar la referencia del sistema y definir el tiempo máximo que se podrá emplear en dicha búsqueda. La figuras 4.29 y 4.30, muestran el diagrama de bloques desarrollado.

Implementación del modo de operación

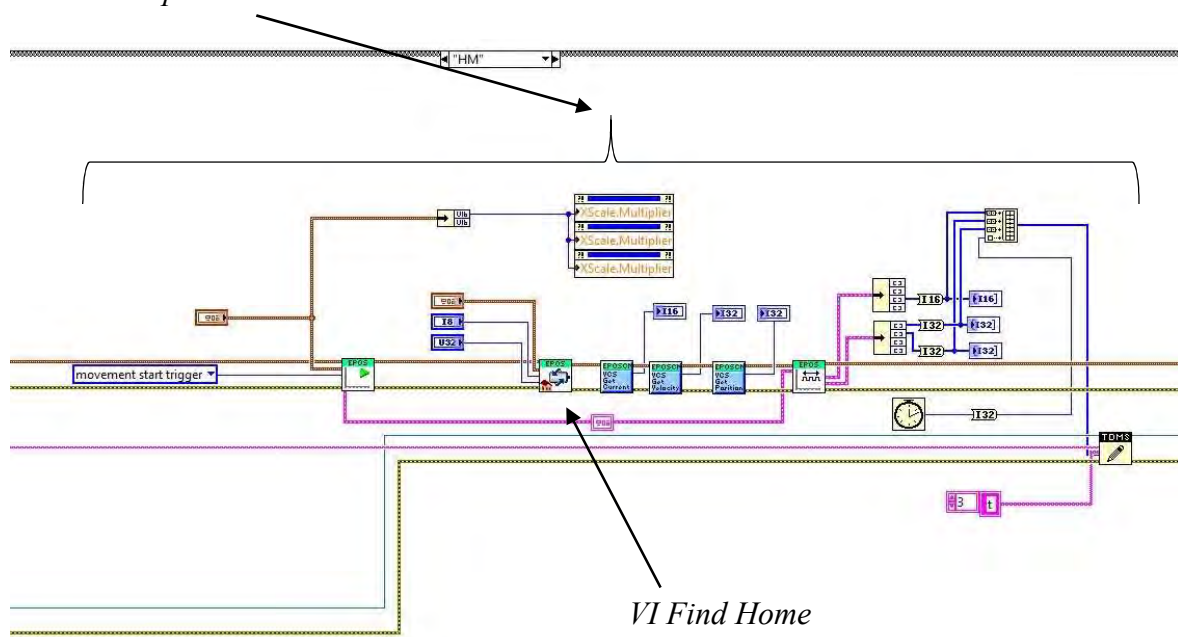


Figura 4.29: Diagrama de bloques del modo HM.

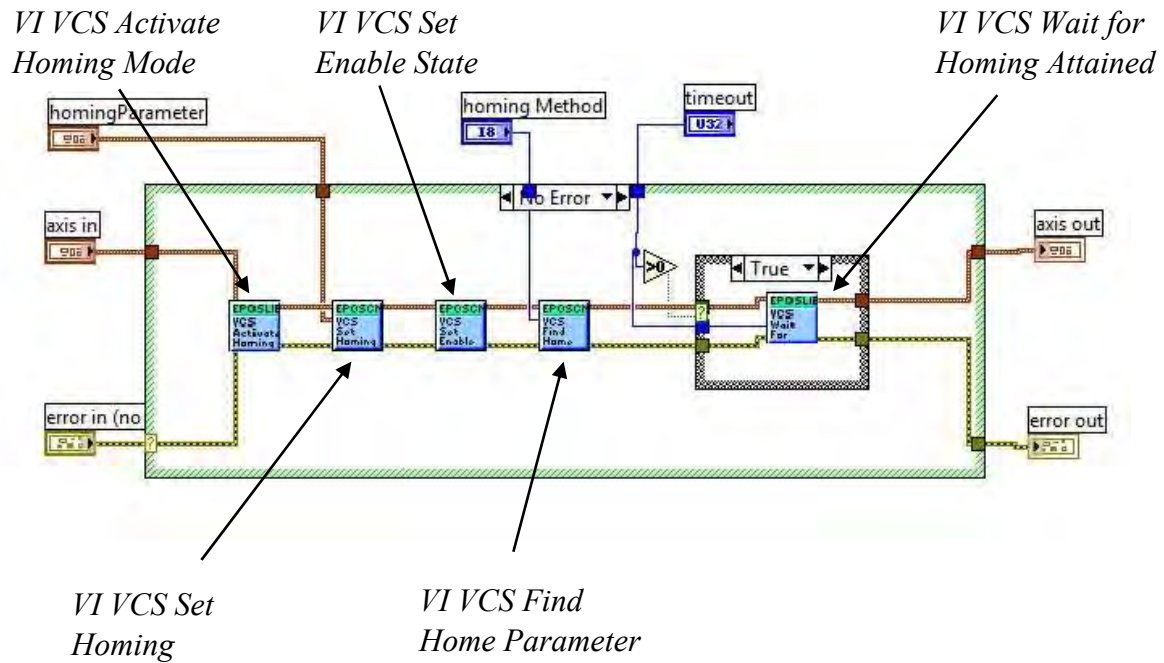


Figura 4.30: Diagrama de bloques interno del subVI Find Home.

4.6.1.3 Interpolated Position Mode (IPM)

IPM es capaz de recorrer sincronizadamente una trayectoria concreta a través de puntos interpolados especificados por el operador, que previamente ha determinado la posición de los puntos, la velocidad de llegada a cada uno y el tiempo de recorrido entre ellos. El controlador interpolará los puntos intermedios, y generará la trayectoria a seguir. Se puede llevar a cabo cualquier perfil con un sistema PVT (*Position and Velocity versus Time*). Un ejemplo de este concepto, se puede observar en la figura 4.31.

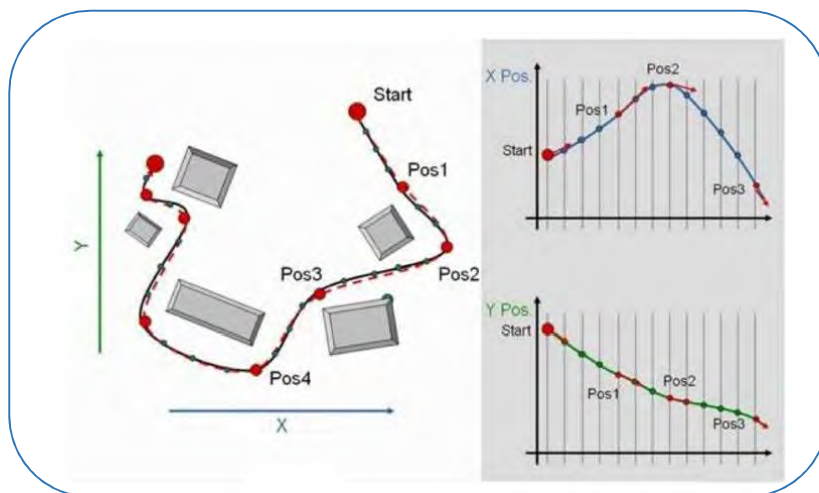


Figura 4.31: Ejemplo de trayectoria interpolada a través de puntos intermedios.

Para simplificar la interpolación, el operador no tendrá que especificar los puntos intermedios, velocidades y tiempos. Se desarrolló una programación para que una nube de puntos intermedia se generará automáticamente indicando la forma de señal a seguir (sinusoidal o triangular). Así pues, siguiendo la misma tónica de interfaz que en los modos anteriores, IPM se puede controlar mediante la pantalla que se muestra en la figura 4.32.

Zona de configuración y generación de la nube de puntos

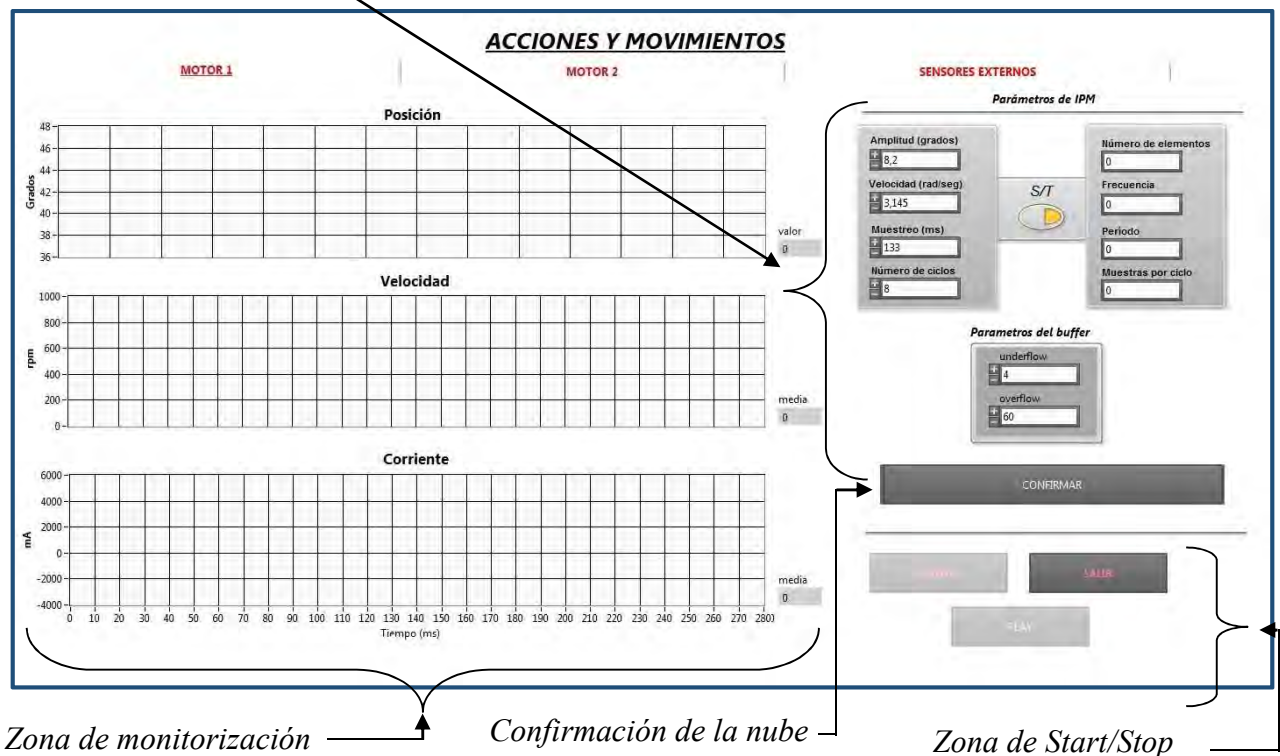


Figura 4.32: Panel frontal para la ejecución en modo IPM.

Los parámetros configurables para la generación de la nube de puntos intermedios que se muestran en la interfaz anterior, son definidos en la tabla XXV.

Tabla XXV: Parámetros de configuración de la nube de puntos de IPM.

Parámetros IPM	Descripción
Amplitud	Amplitud (en grados) de la señal que se va a interpolar.
Velocidad	Velocidad (en rad/s) de la señal que se va a interpolar.
Muestreo	Tasa de muestreo de la señal que se va a interpolar.
Número de ciclos	Número de ciclos de la señal que se va a interpolar.

S/T	Selector de forma de la señal: Sinusoidal/Triangular.
Número de elementos	Indicador del número de elementos que constituirán la señal ya interpolada.
Frecuencia	Indicador de la frecuencia de la señal ya interpolada.
Periodo	Periodo de la señal ya interpolada.
Muestras por ciclo	Muestras por ciclo de la señal ya interpolada.
Underflow	Define el tamaño mínimo del buffer para la nube de puntos.
Overflow	Define el tamaño máximo del buffer para la nube de puntos.

Este modo de operación, es uno de los más complejos en la implementación a través del diagrama de bloques, y consecuentemente, la comprensión a nivel bajo conlleva un tiempo de estudio.

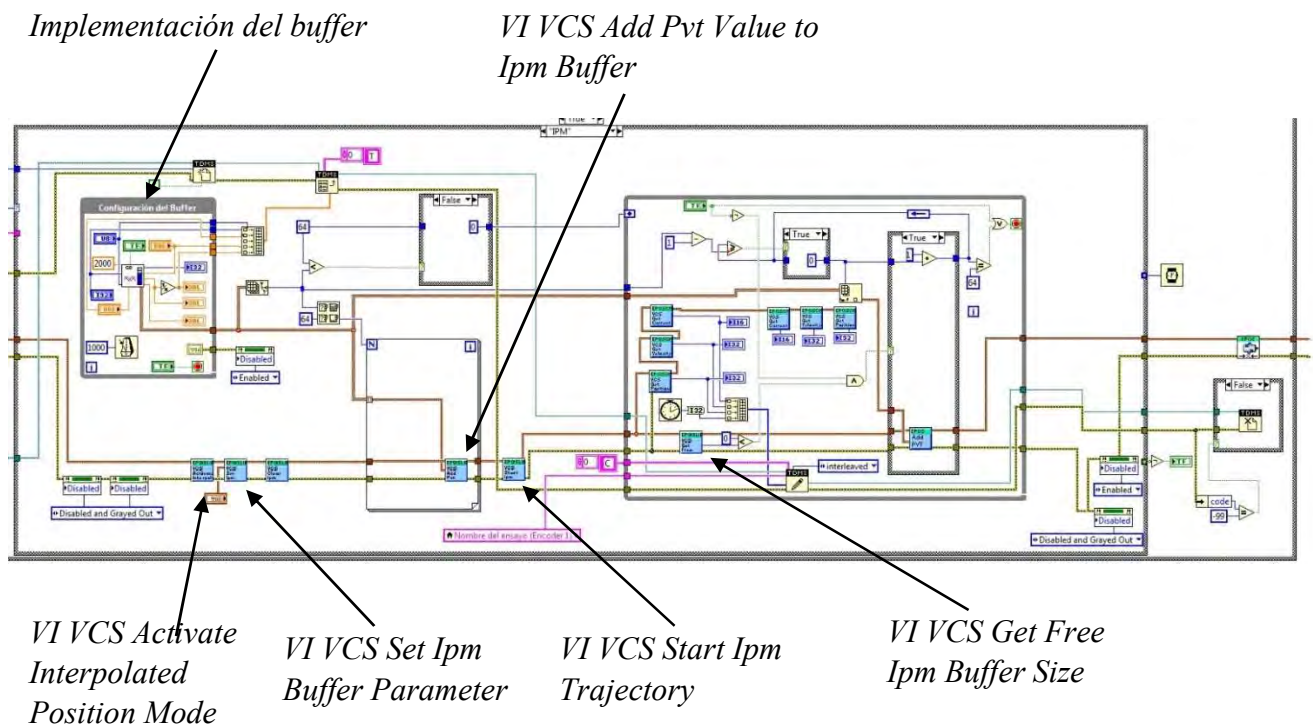


Figura 4.33: Diagrama de bloques del modo IPM.

A través de los diferentes VIs mostrados en la figura 4.33, se consigue generar el movimiento deseado mediante interpolación. Éstos, tienen diferentes objetivos dentro de la programación, como pueden ser, activar el modo IPM, introducir elementos en el *buffer*, liberar el *buffer* o iniciar la trayectoria. Como se observa, es necesario realizar una gran cantidad de arreglos, bucles y operaciones para definir y conseguir con exactitud el control de la trayectoria mediante el seguimiento de una nube de puntos intermedios de referencia.

4.6.1.4 Position Mode (PM)

Este modo de operación, es el más puro desde el punto de vista conceptual para alcanzar una posición deseada. No hay generador de trayectoria ni interpolación intermedia. Directamente, el *software* intentará posicionarse en el punto objetivo a máxima capacidad, estableciendo la velocidad y la aceleración al límite marcado previamente por el operador.

Es por ello que una mala planificación del movimiento por parte del operador, puede causar una parada del sistema, puesto que al operar al máximo de capacidad, aumenta la posibilidad de sufrir desfases entre los valores de posición, velocidad y aceleración demandados y los medidos, presentándose un mensaje de error en el *software* que producirá la detención del modo de operación.

Para poder ensayar con el modo PM, el operador cuenta con la interfaz mostrada en la figura 4.34.

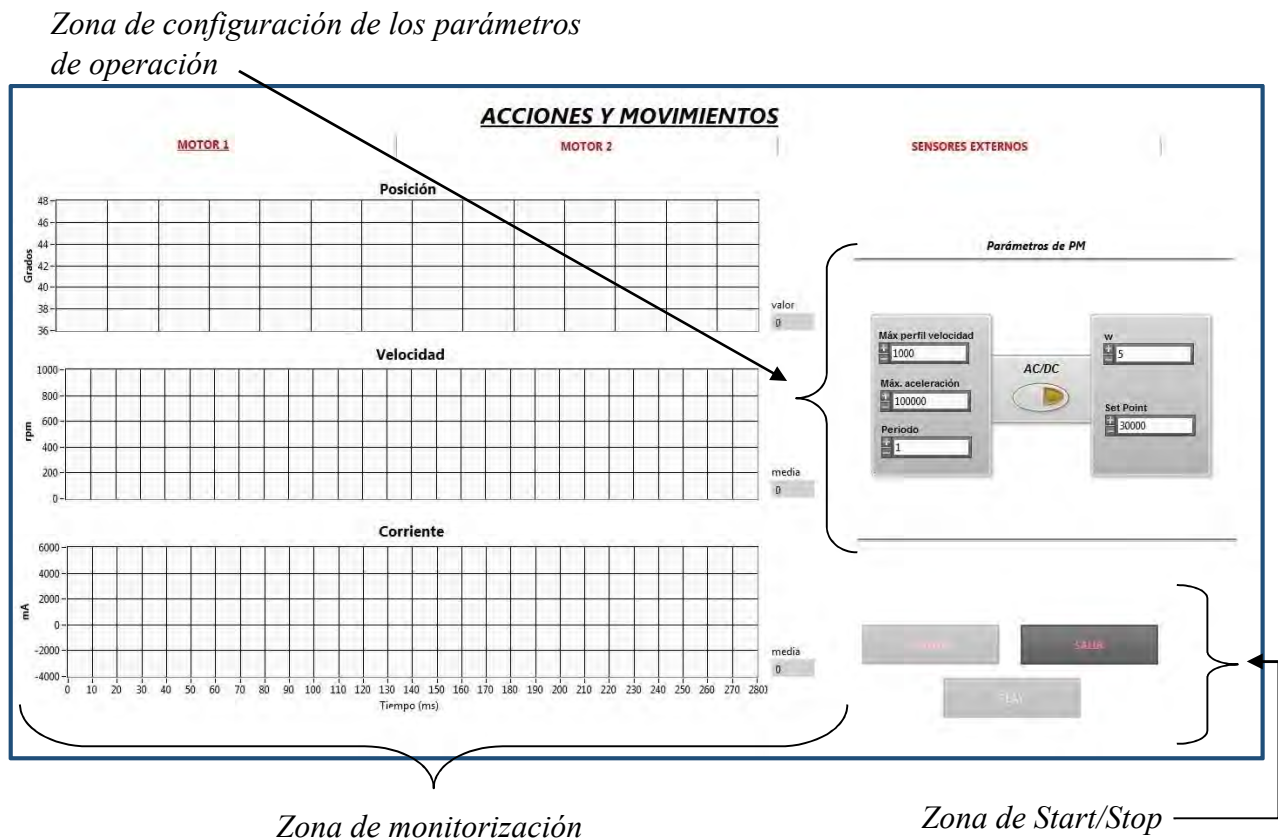


Figura 4.34: Panel frontal para la ejecución en modo PM.

En este modo, el operador contará con dos posibles métodos de seguimiento de la posición. Uno donde deberá seleccionar un punto objetivo (si ha seleccionado el modo DC) para que el sistema lo alcance; y otro, donde el propio *software* generará una señal sinusoidal, con el propósito de que dicha señal sea seguida continuamente (modo AC).



En la tabla XXVI se detallan los parámetros de configuración para que el operador pueda establecerlos correctamente.

Tabla XXVI: Parámetros de configuración del modo PM.

Parámetros PM	Descripción
Máx. perfil de velocidad	Define el valor máximo de la rampa de aceleración (en rpm) para el movimiento.
Máx. aceleración	Define el valor máximo de la velocidad (en rpm/s) alcanzada al final de la rampa de aceleración durante el movimiento.
Periodo W	Tiempo con el que se refresca el <i>Set Point</i> (en ms). Solo utilizado en modo AC. Representa la frecuencia de la señal sinusoidal deseada (en rad/ms).
Set Point	Punto objetivo a alcanzar en modo DC o amplitud de la señal en modo AC (en <i>qc</i>).
AC/DC	Selector de forma de la señal: Sinusoidal/Continuo.

Nota explicativa: modo AC, se genera una señal sinusoidal con una amplitud definida por Set Point. Modo DC, el sistema sigue y alcanza la posición solicitada por Set Point. AC y DC se ejecutan de manera continuada hasta que el operador detenga el modo de operación.

En cuanto al diagrama de bloques desarrollado para PM, se puede señalar que no es tan complejo como en otros modos de operación previamente detallados. Es por ello, que se utilizaron un menor número de *VI*s, de entre los cuales se pueden destacar *VCS Activate Position Mode*, *VCS Set Max Profile Velocity*, *VCS Set Max Acceleration* y *VCS Set Position Must*. Este último, es el que posee la mayor importancia debido a que su función primordial, es la de definir la posición objetivo a alcanzar por el sistema.

En la figura 4.35, se puede observar la programación de bloques implementada.

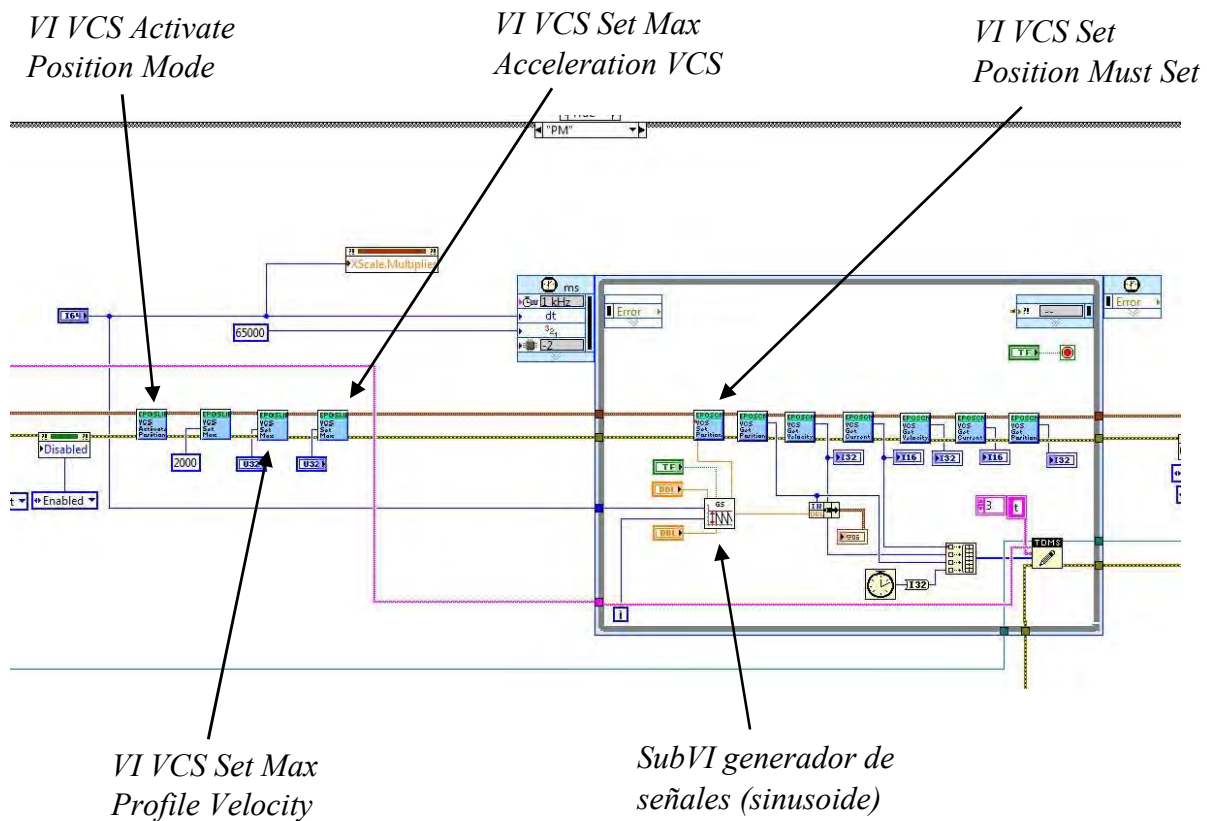


Figura 4.35: Diagrama de bloques del modo PM.

4.6.1.5 Profile Velocity Mode (PVM)

Al igual que PPM, PVM genera una rutina de cálculo interna que, automáticamente, calcula nuevas posiciones teniendo en cuenta la posición actual, punto final, aceleración y la velocidad en un determinado momento. Es decir, calcula y controla las trayectorias para poder alcanzar la velocidad objetivo descrita por el operador.

De esta manera, el eje del motor seguirá y mantendrá una consigna de velocidad, hasta recibir una nueva orden.

Este es el único modo en el que el actuador realizará el movimiento basándose en la regulación de velocidad y no en posición.

Para que al operador le resultase sencillo trabajar con PVM, se estableció el panel HMI mostrado en la figura 4.36, mediante el cual se pueden realizar movimientos siguiendo una consigna de velocidad cuadrada a través de la regulación del actuador en velocidad (modo AC), y movimientos a una velocidad constante durante un tiempo concreto (modo DC).

Zona de configuración de los parámetros de operación

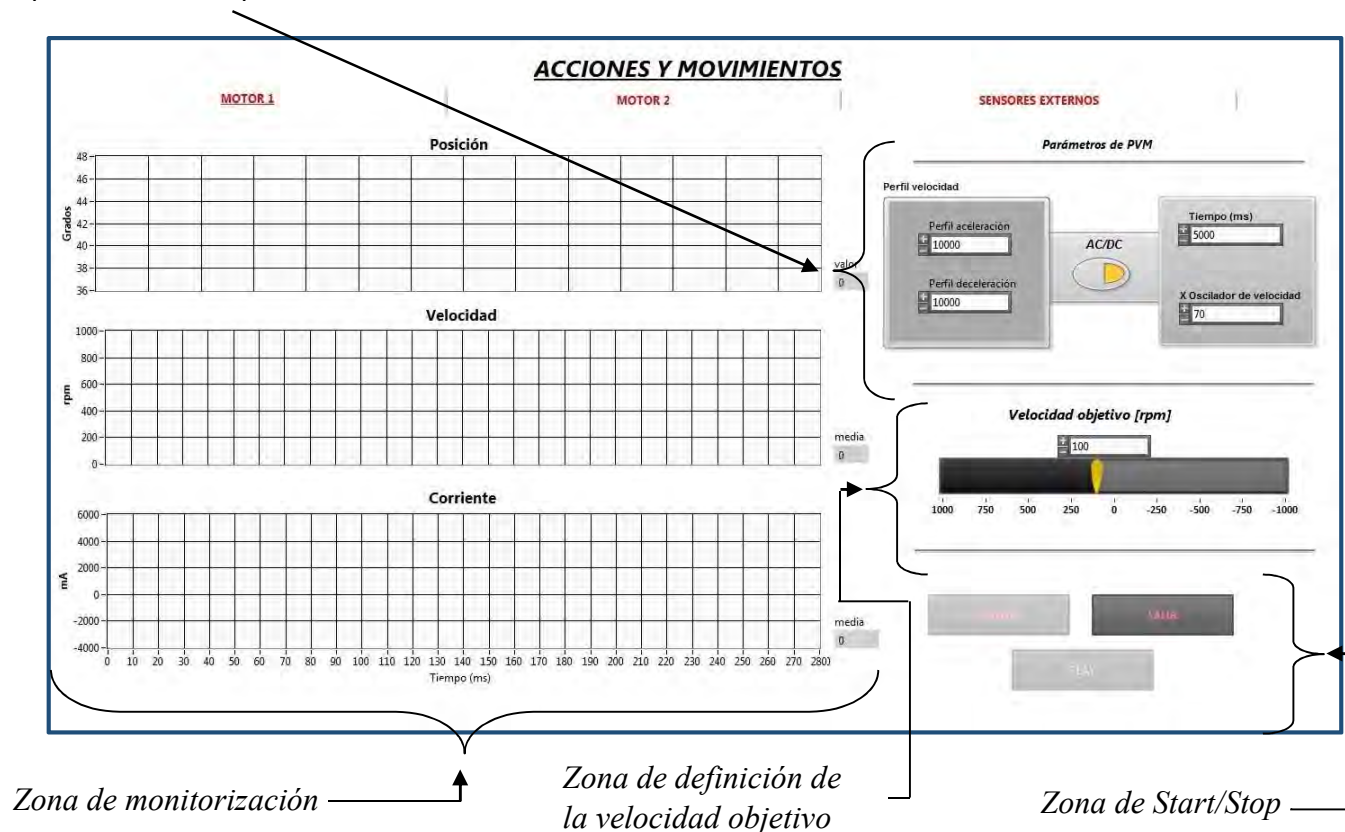


Figura 4.36: Panel frontal para la ejecución en modo PVM.

Esta posibilidad de selección entre mantener una velocidad constante o realizar una consigna de velocidad cuadrada, constituye la mayor complejidad en este modo de operación. En la tabla XXVII, se definen todos los parámetros de configuración que el operador debe conocer.

Tabla XXVII: Parámetros de configuración del modo PVM.

Parámetros PVM	Descripción
Perfil de aceleración	Define la rampa de aceleración (en rpm/s) para el movimiento.
Perfil de deceleración	Define la rampa de deceleración (en rpm/s) para el movimiento.
Tiempo	Máximo tiempo (en ms) que el controlador espera la consecución de la velocidad objetivo.
X del oscilador de velocidad	Tiempo que se desea mantener el movimiento (en número de ciclos del lazo de control de velocidad).

Velocidad objetivo	Definición de la velocidad objetivo (en rpm) que se desea alcanzar.
AC/DC	Selector de forma de la señal: cuadrado/continuo.

Nota explicativa: modo AC, se alcanza la velocidad solicitada y después se decrementa hasta el mismo valor pero con sentido contrario (como un cuadrado). Modo DC, se alcanza la velocidad solicitada y posteriormente se para.

AC se ejecuta de manera continuada hasta que el operador detenga el modo de operación.

PVM se ejecuta a través del diagrama de bloques mostrado en las figuras 4.37 y 4.38, donde el subVI denominado *Oscilador de Velocidad* será el encargado de controlar el movimiento cuadrado o simple, según se haya seleccionado. Posteriormente, el subVI PVM se encargará de realizar el movimiento descrito por el *Oscilador de Velocidad* mediante el VI *Move With Velocity*.

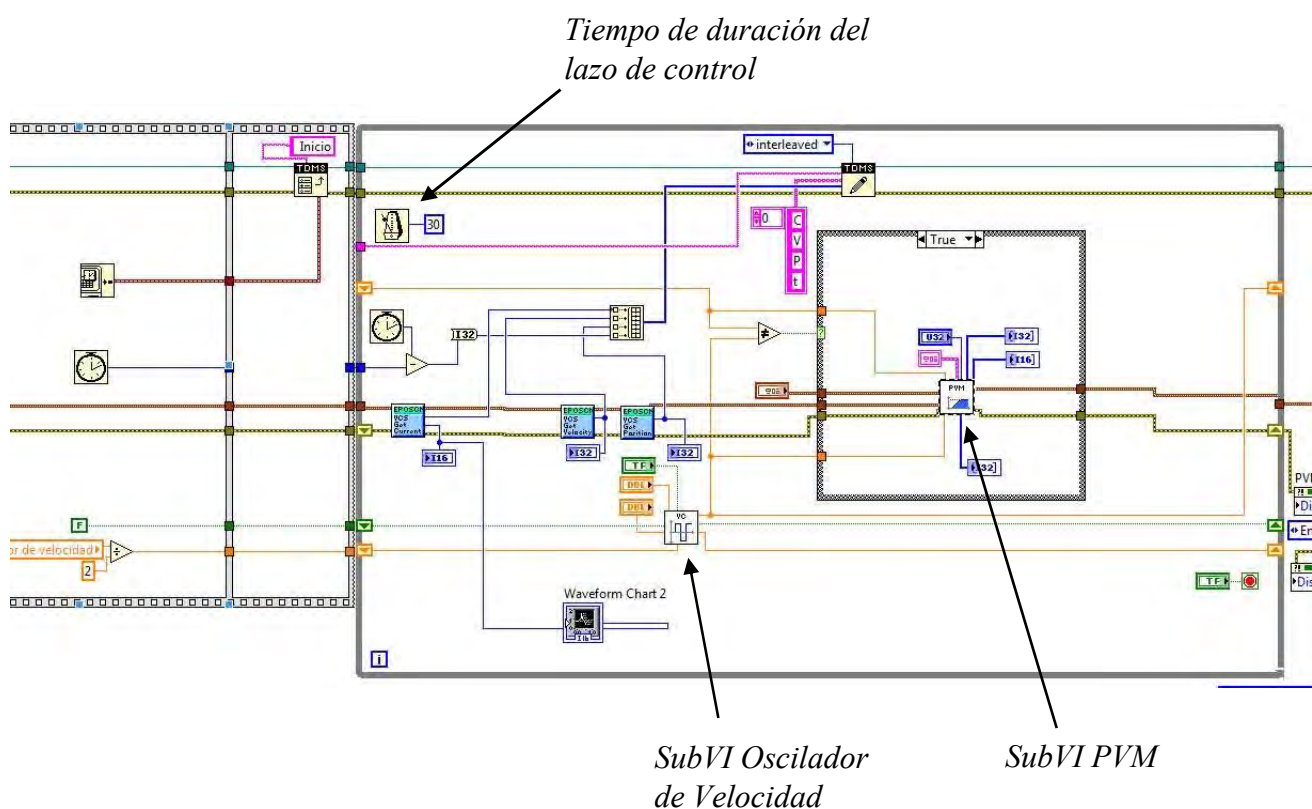


Figura 4.37: Diagrama de bloques del modo PVM.

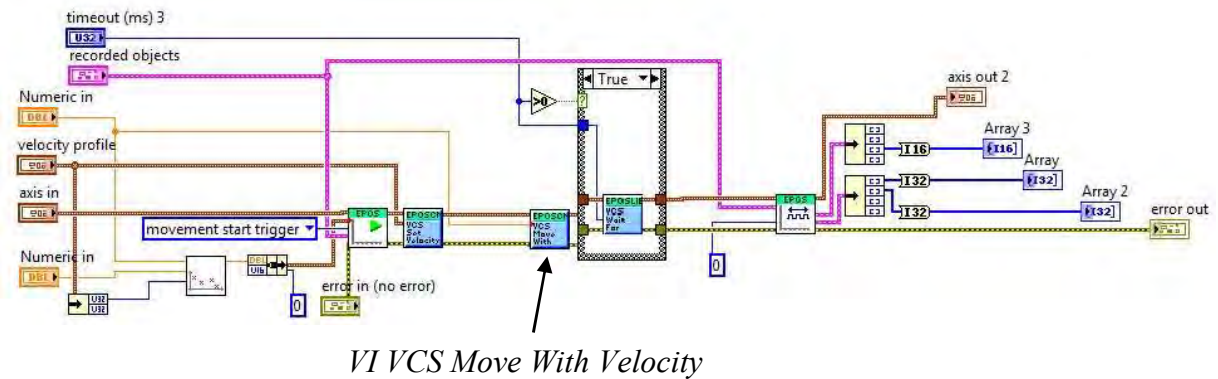


Figura 4.38: Diagrama de bloques interno del subVI PVM.

4.6.1.6 Current Mode (CM)

Este último modo de operación, está basado en la función de control en corriente, recibiendo y comparando el valor de demanda actual, con el valor máximo definido previamente. Este es el único modo en el que el actuador realizará el movimiento basándose en la regulación en corriente y no en posición o velocidad.

Para dirigir y controlar CM, el operador cuenta con la interfaz mostrada en la figura 4.39.

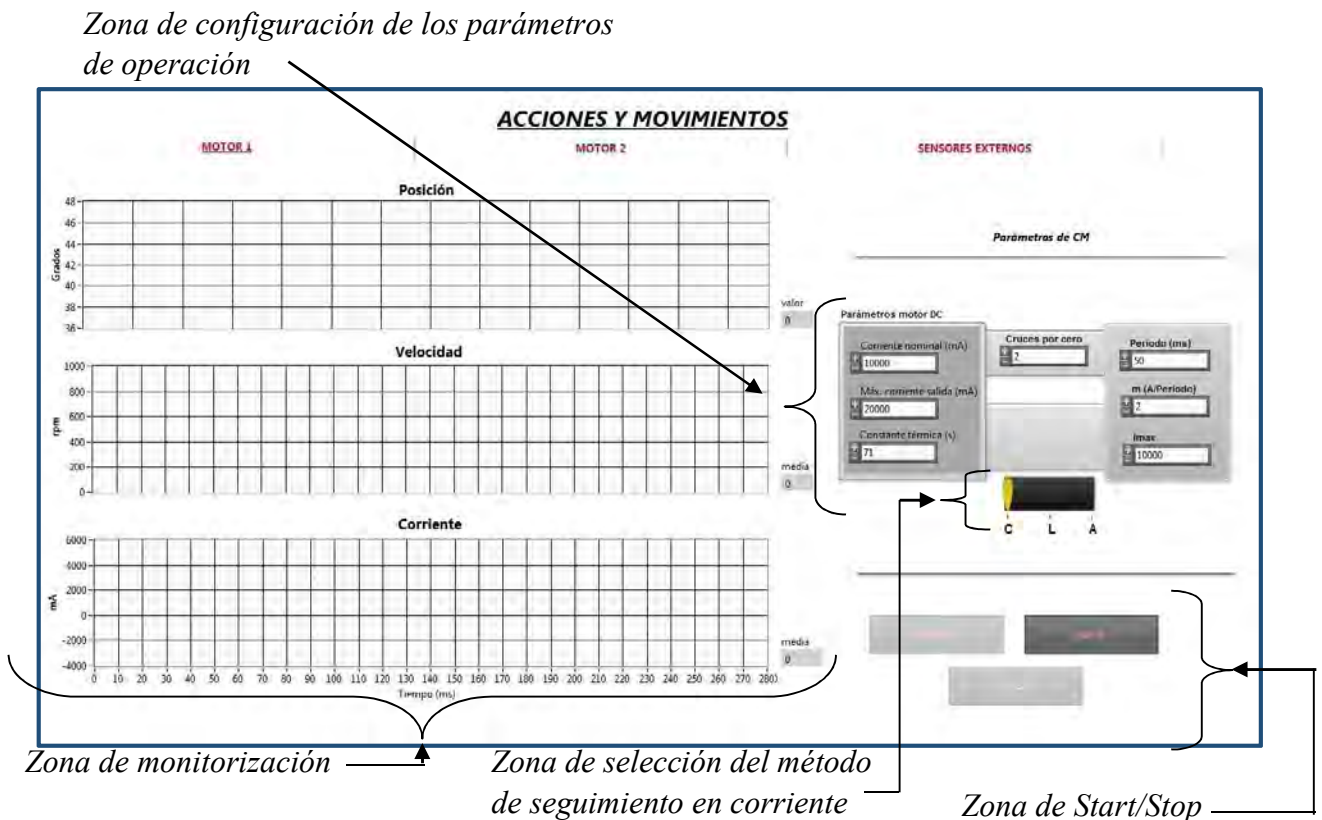


Figura 4.39: Panel frontal para la ejecución en modo CM.

Donde el operador puede configurar los parámetros, descritos en la tabla XXVIII:

Tabla XXVIII: Parámetros de configuración del modo CM.

Parámetros CM	Descripción
Corriente nominal	Corriente nominal característica del motor (en mA).
Máxima corriente salida	Máxima corriente permisible por el motor (en mA).
Constante térmica	Constante térmica característica del motor (en s).
Cruces por cero	Solo utilizado en modo L. Número de veces que se cruza el valor 0 en corriente.
m	Solo utilizado en modo L. Variación de corriente en un periodo (en mA/periodo).
Periodo	Solo utilizado en modo L. Tiempo con el que se refresca la consigna de corriente (en ms).
Imáx	Corriente objetivo a alcanzar (en mA).
Selector C/L/A	Selector de forma de la señal: <ul style="list-style-type: none"> - C: Constante - L: Lineal - A: Aleatorio

Nota explicativa: *modo A, se alcanza la corriente aleatoria solicitada (comprendida entre $\pm Imáx$). Modo C, se alcanza la corriente solicitada. Modo L, realiza incrementos (alcanzando la $Imáx$) y decrementos lineales, cruzando por cero tantas veces como indique el parámetro Cruces por cero. A, C y L se ejecutan de manera continuada hasta que el operador detenga el modo de operación.*

La lógica de programación implementada para CM, se puede observar en la figura 4.40. En ella se destaca el *VI VCS Set Current Must* encargado de establecer la corriente en el actuador, y el *subVI Triangulo Corriente* ocupado de fijar el método de seguimiento en corriente (C, L o A) para que el actuador pueda operar en consecuencia. El selector con las tres posibilidades de funcionamiento dentro de este modo de operación, se ha implementado a través de un bucle *case*, como muestra la figura 4.41.

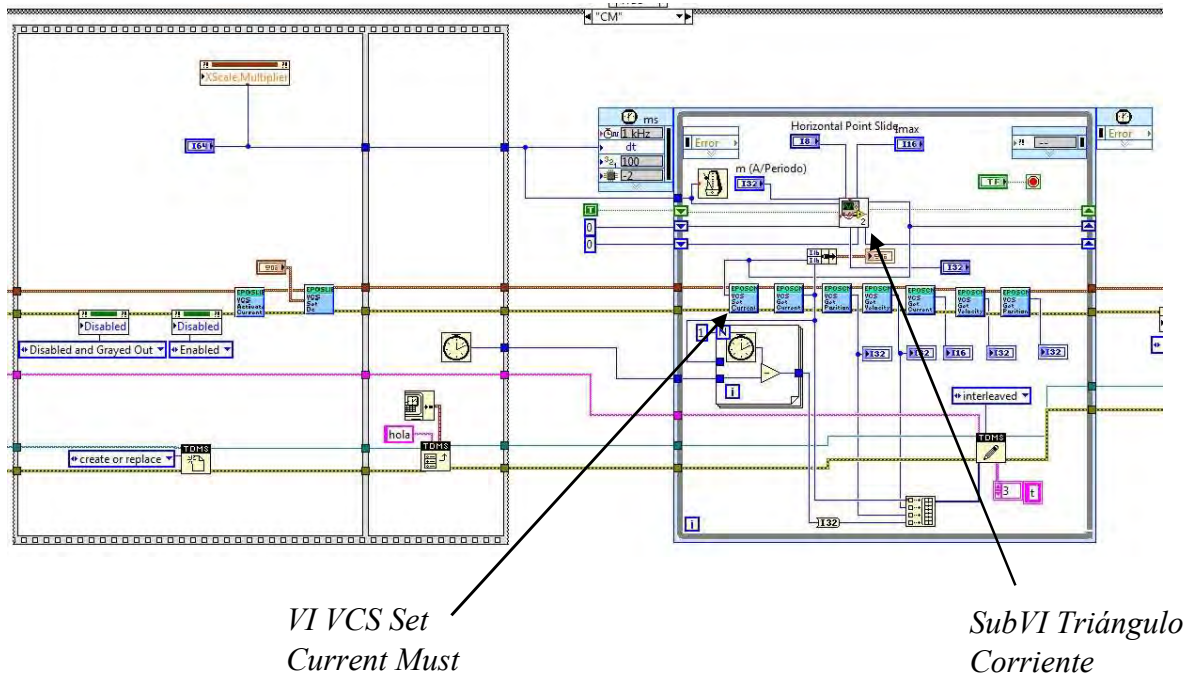


Figura 4.40: Diagrama de bloques del modo CM.

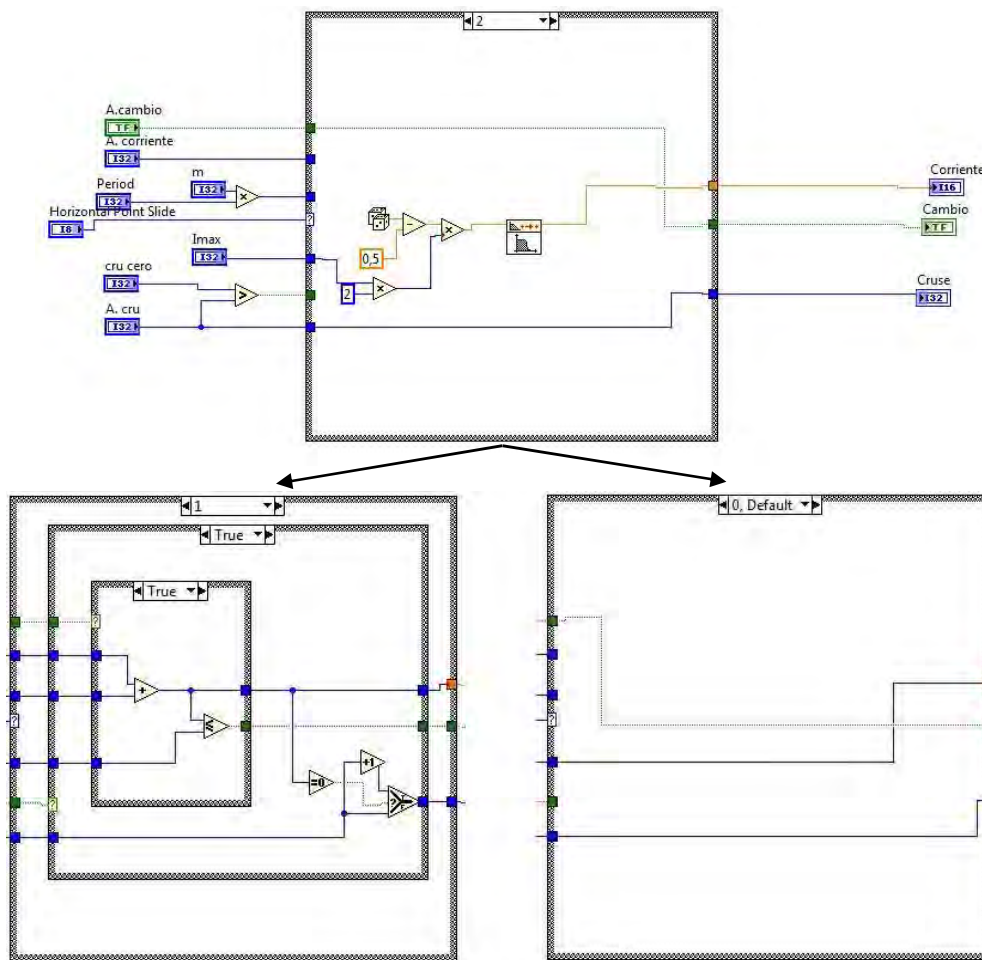


Figura 4.41: Diagrama de bloques interno del subVI Triángulo Corriente.

4.6.2 Motor de ajuste de rigidez

Una vez detallados todos los modos de operación posibles para el motor principal, es posible definir los modos de operación habilitados para el motor secundario (en el caso de AVASTT) para poder generar el ajuste de rigidez.

Dichos modos seleccionables por el operador son:

- *Profile Position Mode (PPM)*
- *Homing Mode (HM)*
- *Interpolated Position Mode (IPM)*
- *Position Mode (PM)*

Puesto que tanto la interfaz mostrada, así como los respectivos diagramas de bloques son iguales que en el caso del motor principal, no es necesario detallar de nuevo las implementaciones. Aun así, si el lector lo desea, podrá realizar un análisis rápido mediante las figuras mostradas a continuación, para cada modo de operación habilitado en el motor secundario.

4.6.2.1 Profile Position Mode (PPM)

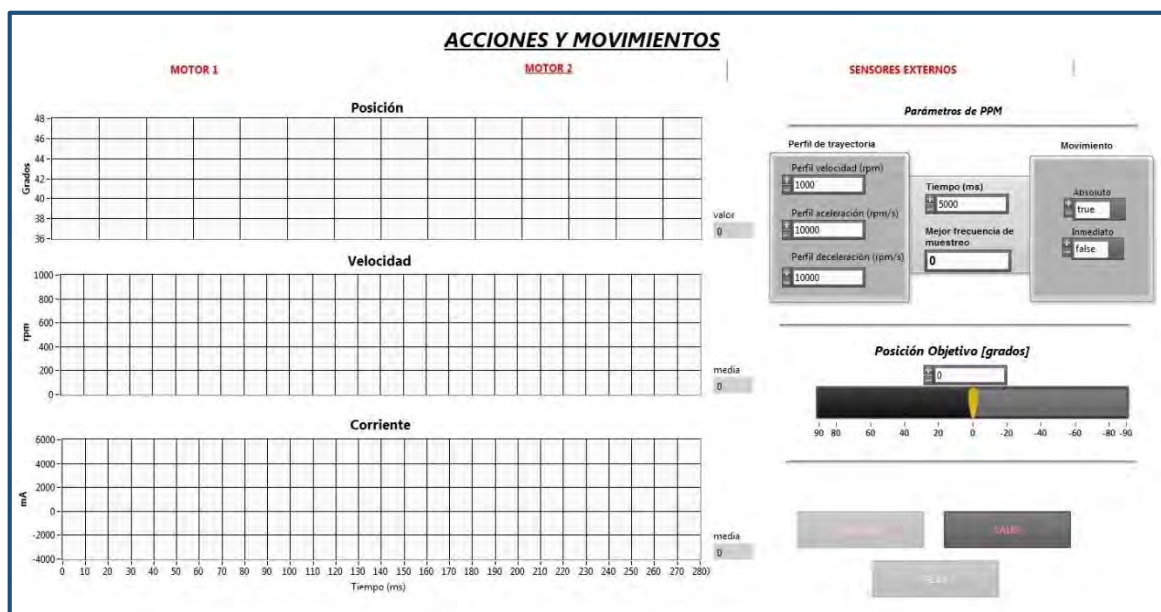


Figura 4.42: Panel frontal para la ejecución en modo PPM en el motor secundario.

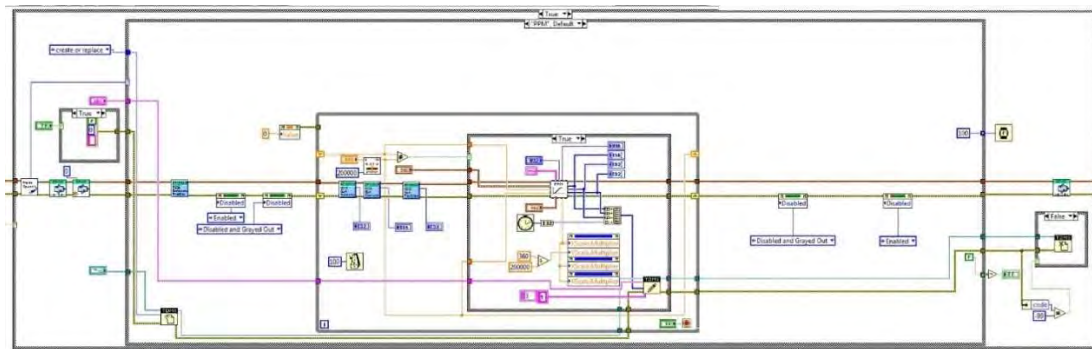


Figura 4.43: Diagrama de bloques del modo PPM en el motor secundario.

4.6.2.2 Homing Mode (HM)

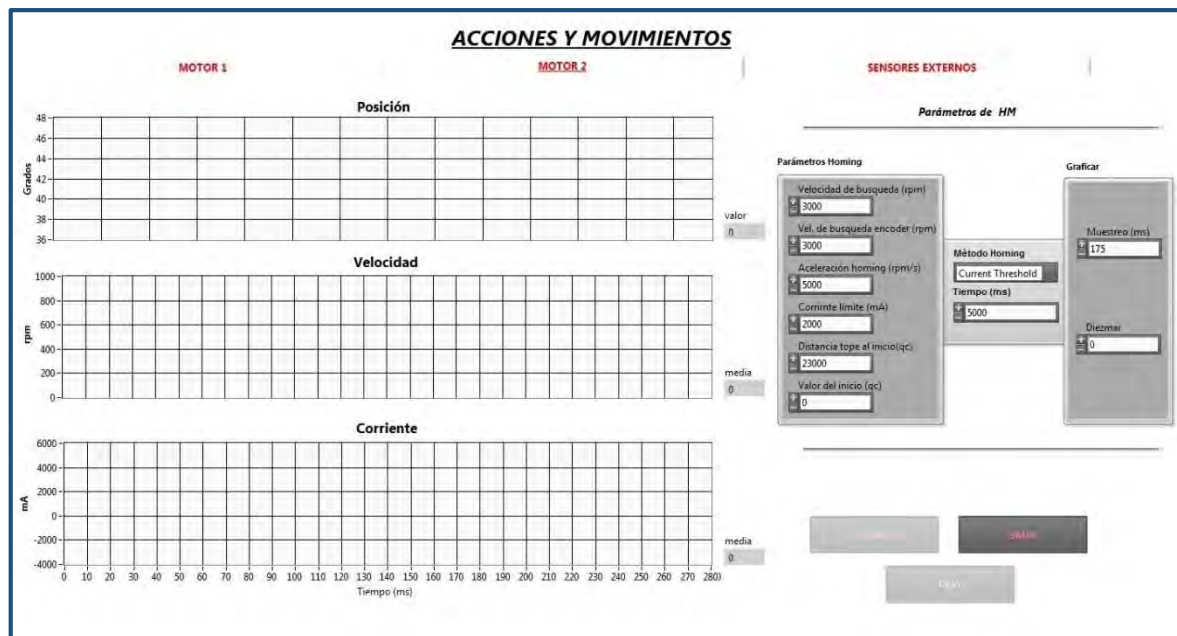


Figura 4.44: Panel frontal para la ejecución en modo HM en el motor secundario.

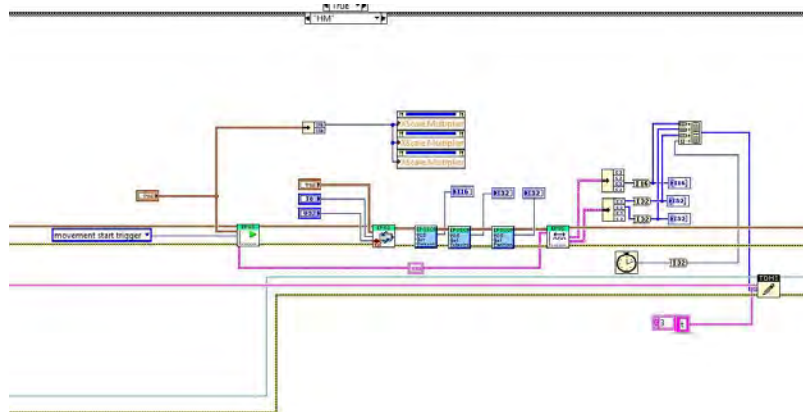


Figura 4.45: Diagrama de bloques del modo HM en el motor secundario.

4.6.2.3 Interpolated Position Mode (IPM)

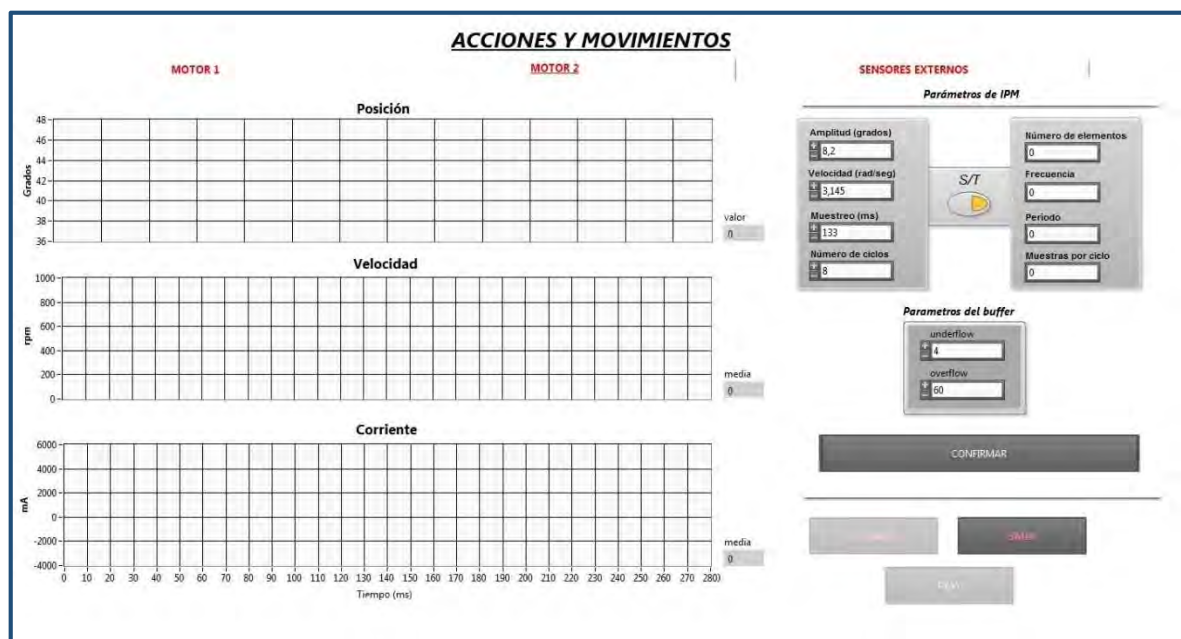


Figura 4.46: Panel frontal para la ejecución en modo IPM en el motor secundario.

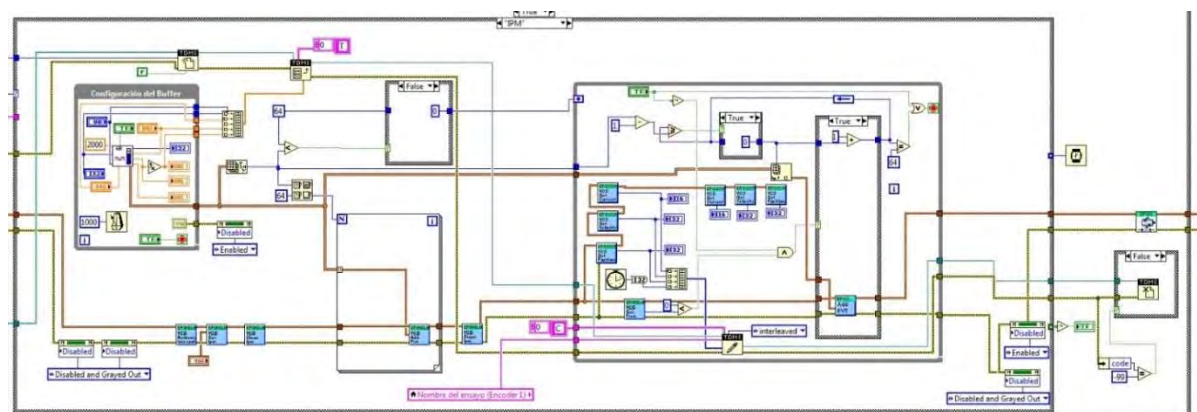


Figura 4.47: Diagrama de bloques del modo IPM en el motor secundario.

4.6.2.4 Position Mode (PM)

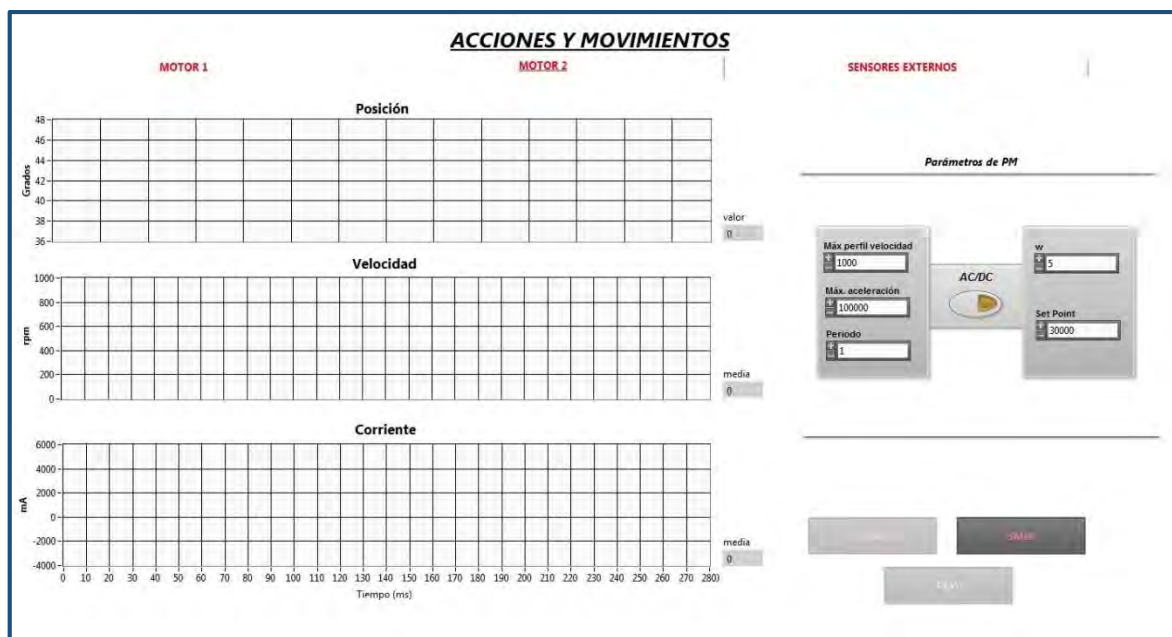


Figura 4.48: Panel frontal para la ejecución en modo PM en el motor secundario.

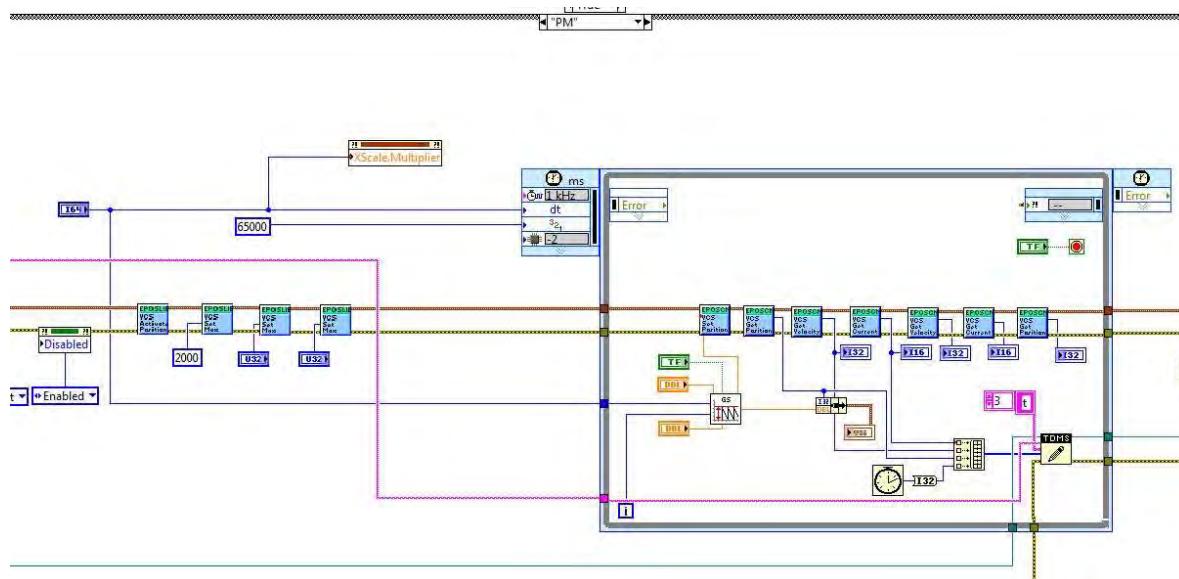


Figura 4.49: Diagrama de bloques del modo PM en el motor secundario.

4.6.3 Sensores extrínsecos

Desde el punto de vista de la programación *software*, cada sensor tiene su propia manera de funcionar, lo que implicó mayor complejidad, ya que debía estudiarse y entenderse cada uno de manera individualizada. Precisamente por esa dificultad, se realizará una breve descripción para cada caso:

- Acelerómetros

Como se ha comentado previamente, era necesario ofrecer la posibilidad de conectar cuantos acelerómetros fueran necesarios. Es por ello que se realiza una matriz de acelerómetros a través de un bucle *for*, que leerá las propiedades de cada acelerómetro seleccionado, como se ilustra en la figura 4.51. Posteriormente, toda esa información será contenida en un *subVI* que estará directamente conectado a la lectura analógica del sistema DAQ mediante el *VI DAQmx Read*. Tras esa primera lectura, esos datos serán tratados por un filtro para mejorar la señal y eliminar ruidos. Posteriormente se presentará la señal “limpia” si el usuario así lo requiriera (Figura 4.50).

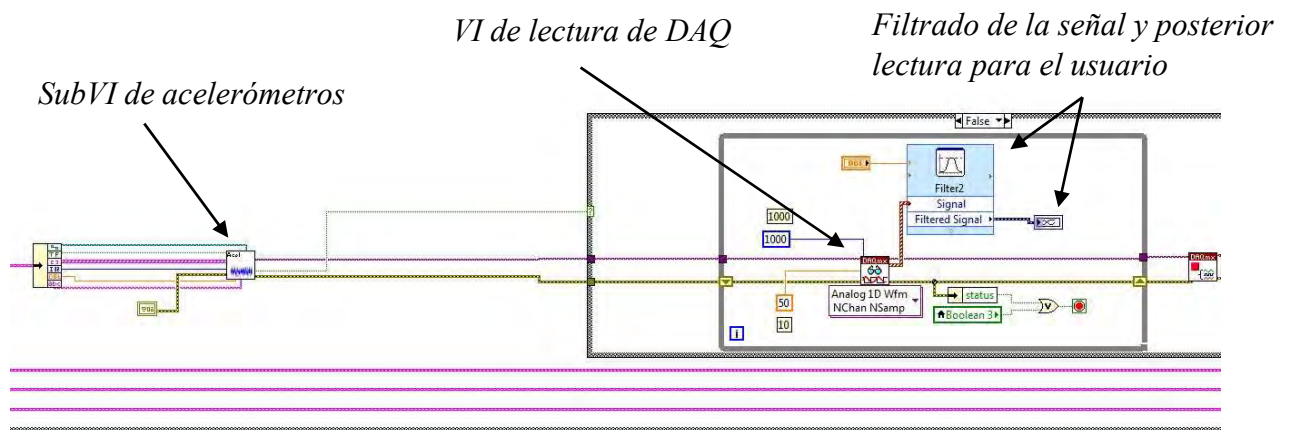


Figura 4.50: Diagrama de bloques para la monitorización de los acelerómetros.

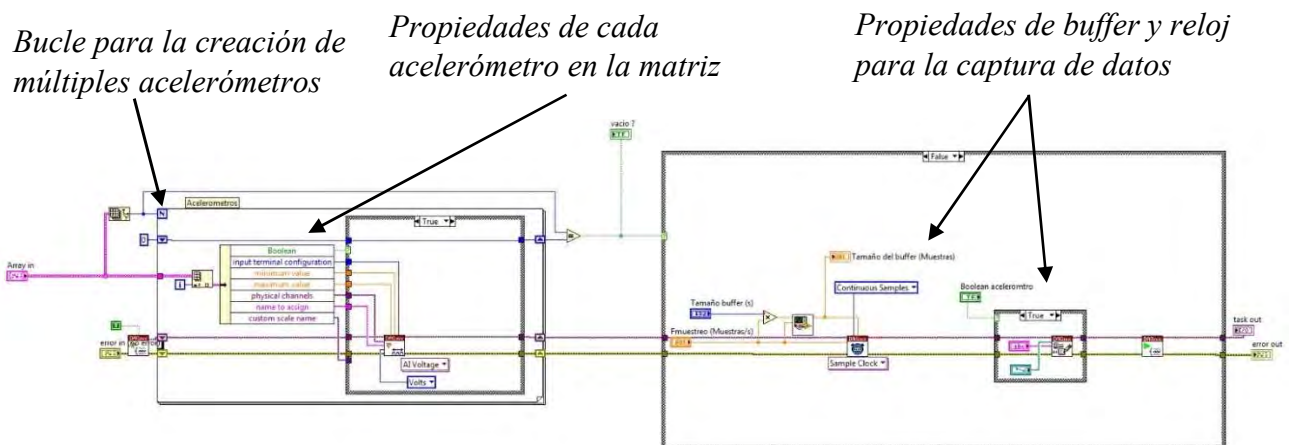


Figura 4.51: Diagrama de bloques para la lectura de los acelerómetros.

- Encoders

Al igual que en el caso de los acelerómetros, la posibilidad de conectar múltiples encoders era necesaria, es por ello, que la lógica de programación sigue un patrón muy similar. Se realiza un configurado previo de los encoders en el *subVI* de

encoders (Figura 4.53). Dentro se definirán las propiedades de cada encoder, así como los parámetros de canal y muestra. Posteriormente, toda la información contenida en dicho *subVI* será conectada a la lectura analógica del sistema DAQ mediante el *VI DAQmx Read* (Figura 4.52). Se debe destacar que la lógica interna del *subVI* conlleva una gran complejidad, centrada en la configuración de los tiempos de reloj para la recogida de datos, así como en el funcionamiento secuencial de los diferentes encoders (Figura 4.53).

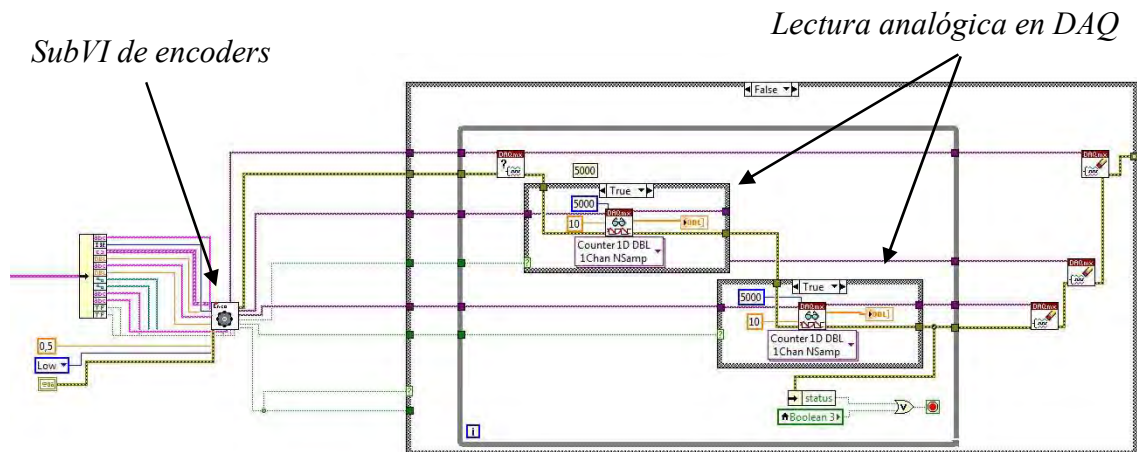


Figura 4.52: Diagrama de bloques para la monitorización de los encoders.

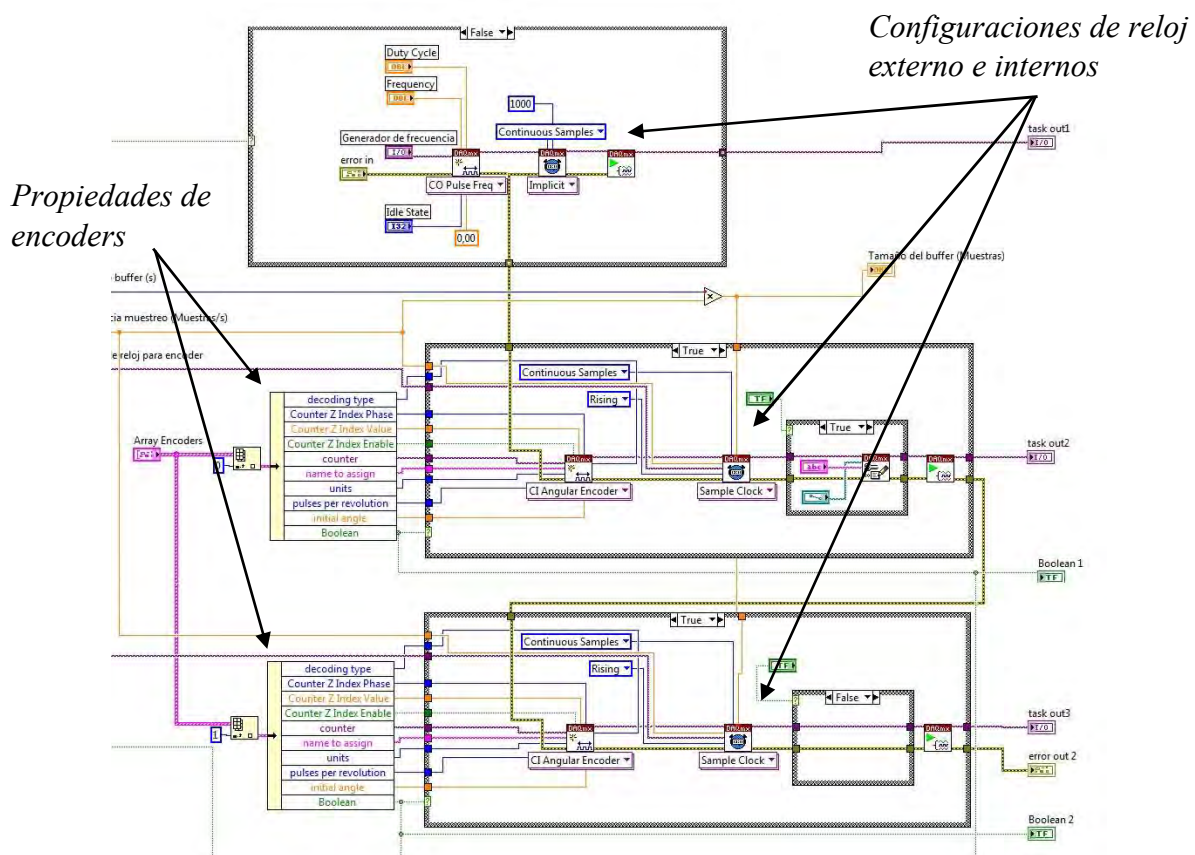


Figura 4.53: Diagrama de bloques para la lectura de los encoders.

4.7 Monitoreo de sensores

4.7.1 Asociados al PC maestro

El PC maestro será el encargado de gestionar los sensores internos, encoders y acelerómetros del banco. Dicha monitorización se puede realizar mediante la ejecución de los modos de operación para el caso de los sensores internos, o directamente mediante la pantalla denominada “monitorizar sensores”; la cual, dispone de un acceso directo desde el menú principal (Figura 4.54).

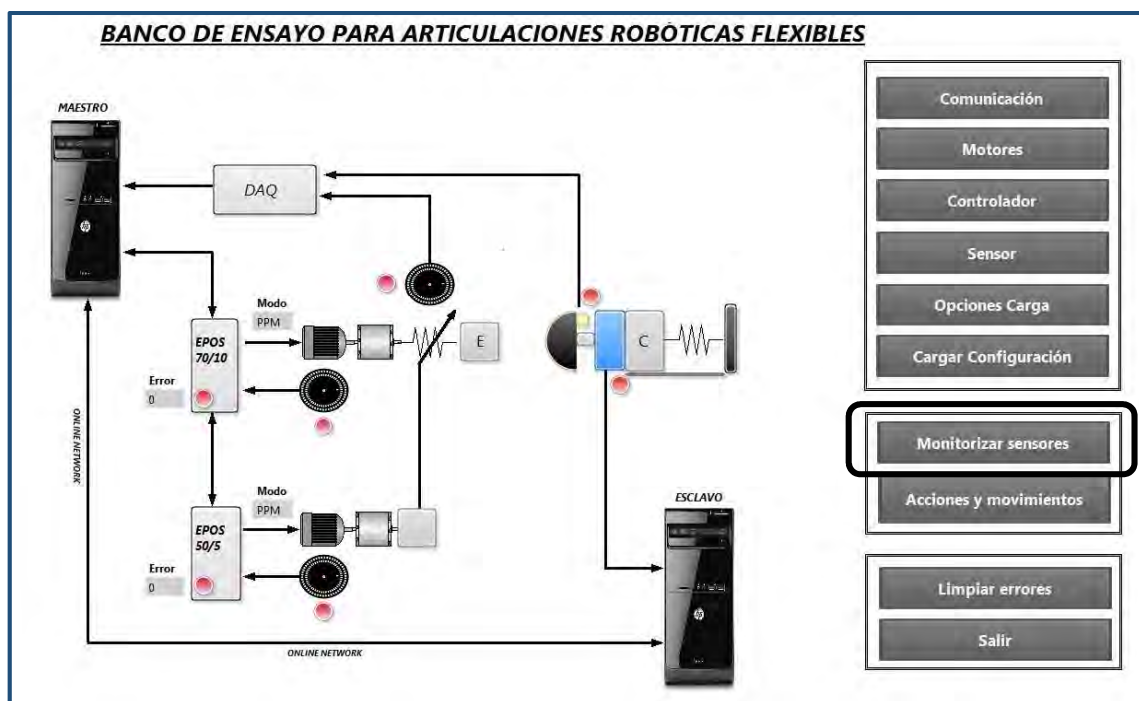


Figura 4.54: Panel frontal del menú principal.

Una vez seleccionado en el menú principal, el operador visualizará la siguiente pantalla (Figura 4.55).

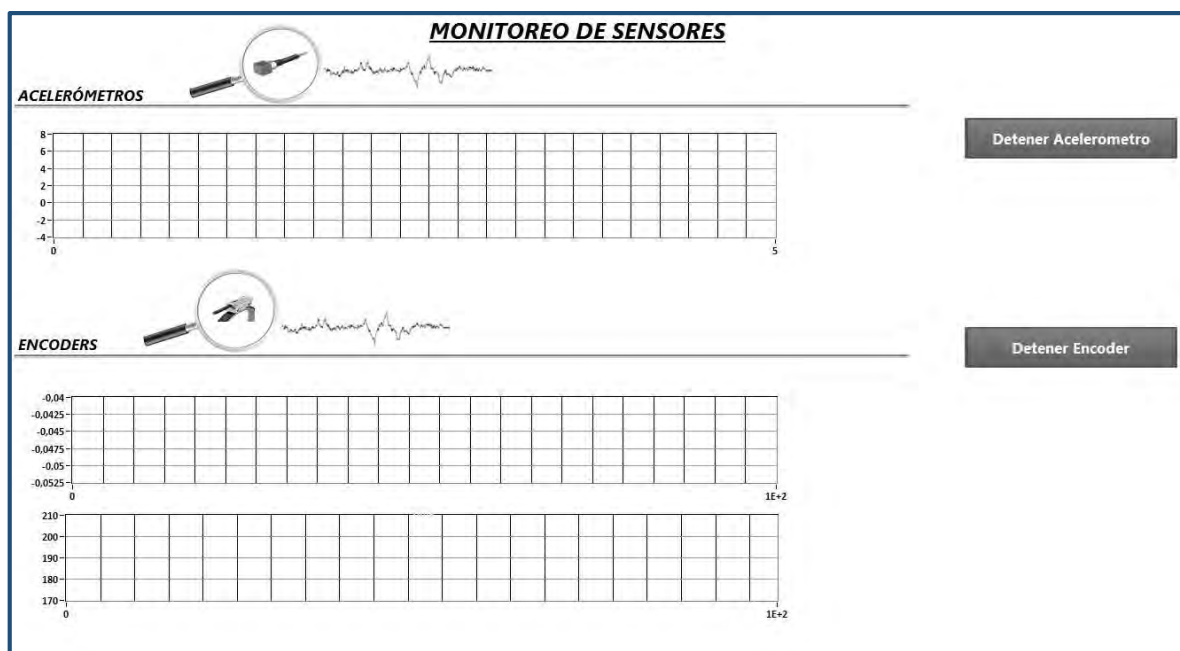


Figura 4.55: Panel frontal para la monitorización directa de los sensores extrínsecos.

En esta última interfaz, y de una manera muy sencilla y visual, se podrán observar los datos obtenidos de los mencionados sensores en tiempo real.

Para comprender la lógica que controla y muestra estos sensores, el lector puede referirse al capítulo 4.6.3 - *Sensores extrínsecos*, donde podrá encontrar la información de la programación a nivel bajo desarrollada.

En cuanto a los sensores internos (posición, velocidad y corriente), el operador los visualizará de manera directa cuando realice movimientos con el actuador, ya que estos parámetros son fundamentales en todos los tipos de movimientos asociados a cada modo de operación.

Desde el punto de vista de la programación de bloques, los sensores internos no tienen una lógica de configuración tan compleja y detallada como en el caso de los sensores extrínsecos. Estos datos provienen del tipo de control que se esté realizando. El operador solo tiene que seleccionar si desea guardar los datos recogidos de posición, velocidad y corriente. Por ello la programación del guardado de dichos datos está integrada dentro los diferentes tipos de movimientos, mediante los *VI*s *VCS Get Position Is*, *VCS Get Current is Averaged* y *VCS Get Velocity is Averaged*, como se puede ver a continuación, en el modo *Homing Mode* que se ha seleccionado como ejemplo (Figura 4.56).

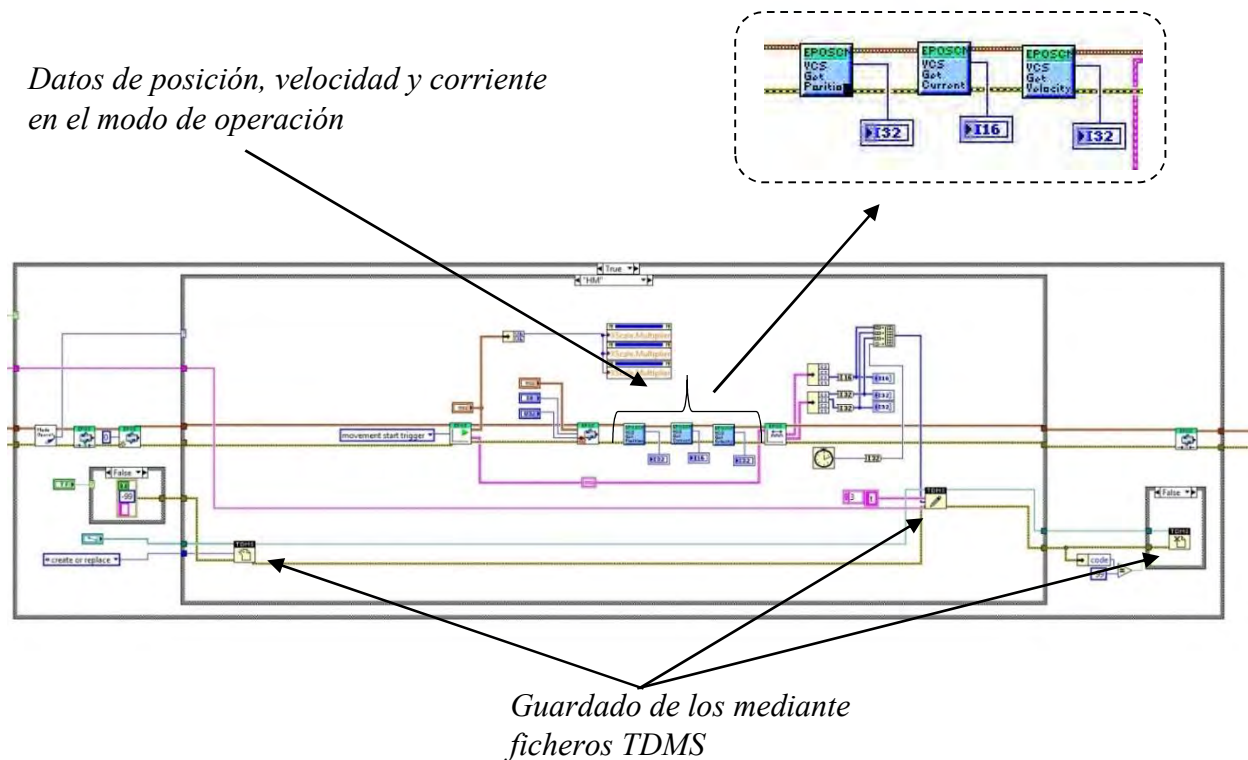


Figura 4.56: Diagrama de bloques para la monitorización de sensores intrínsecos en el caso del modo de operación HM.

4.7.2 Asociados al PC esclavo

La estación esclava se diseñó exclusivamente con un propósito: proporcionar soporte al sensor de fuerza/par JR3. Esto es debido a que los *drivers* asociados al mencionado sensor, no eran compatibles con el sistema operativo del PC Maestro. También facilitaba la optimización de recursos debido a la compleja programación que necesitaba dicho sensor, lo que sobrecargaba al maestro si este sensor fuera incorporado en su programación. Es por ello que esta estación estará en todo momento bajo el control del PC Maestro, pero realizando una adquisición de datos de manera aislada, consiguiendo así una estación dedicada al sensor de fuerza pero que al mismo tiempo responde al control del PC principal vía *network*, estando subordinado a las decisiones del operador.

Todo ello implica que éste sensor disponga de una lógica claramente diferente al resto. Como se ha introducido, ciertos parámetros son elegidos por el operador en el computador Maestro para ser sincronizados vía red al computador esclavo, encargado de realizar el tratamiento de los datos. Para una mayor comprensión, a continuación se muestra la programación contenida en el programa Maestro y en el Esclavo.

Como se puede ver en la figura 4.57, hay *VI*s con forma cuadrada que cuentan con una pequeña “mosca” azul en la parte superior izquierda. Ello indica que dichos *VI*s son variables en red que están interconectadas con otro sistema; en este caso, el Esclavo. Dichos parámetros son los que se pueden ver en el HMI del Maestro, como pueden ser

las escalas, la aplicación de las mismas, el *reset* de *offsets*, y otros parámetros de sincronización.

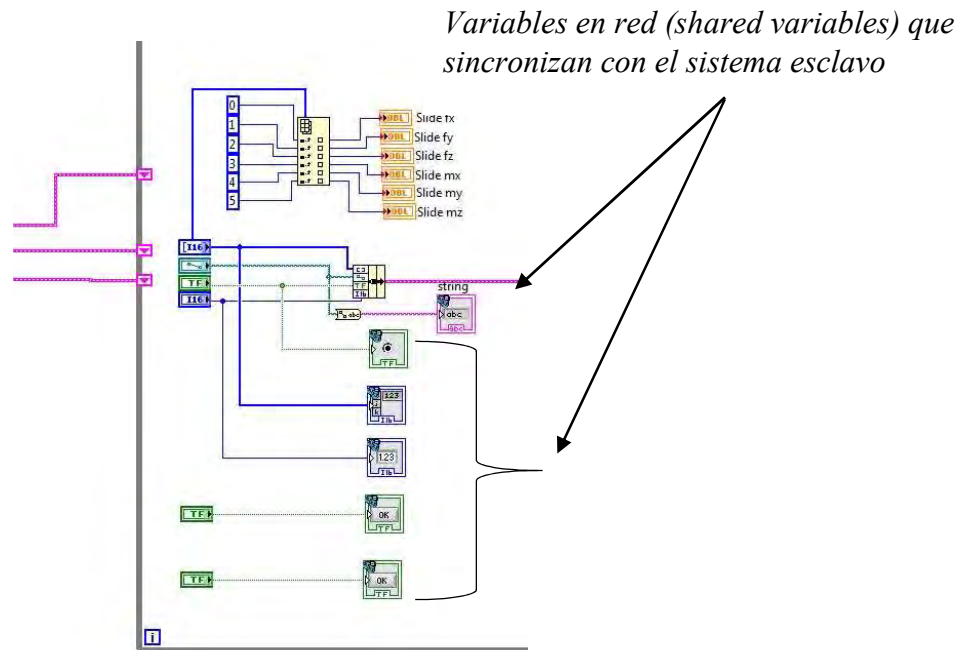


Figura 4.57: Diagrama de bloques del sensor fuerza/par JR3, donde se muestran los bloques con “mosca azul” que indican que son variables compartidas en red.

Ya en el sistema esclavo, se utilizan *VI*s especialmente diseñados para conectar con el sensor JR3 (Figura 4.58).

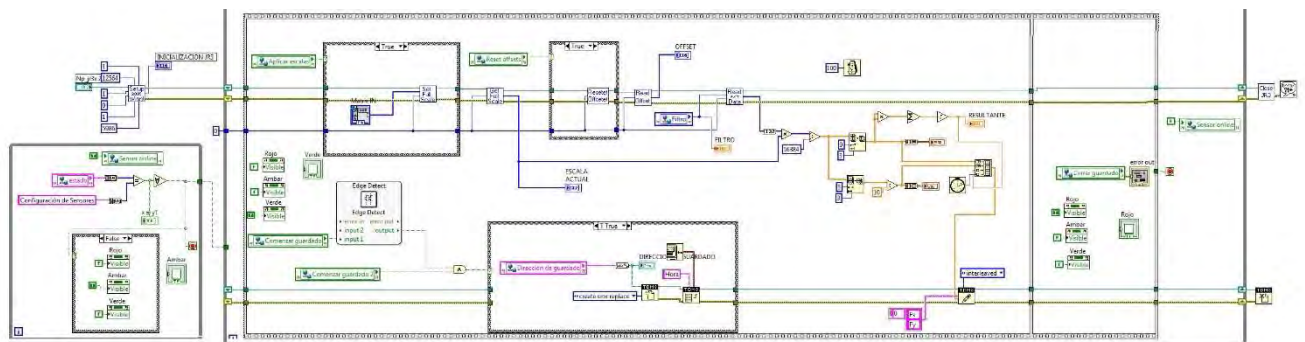


Figura 4.58: Diagrama de bloques del sensor fuerza/par JR3 en la estación esclava.

Donde se hace especialmente hincapié en la parte mostrada en la figura 4.59.

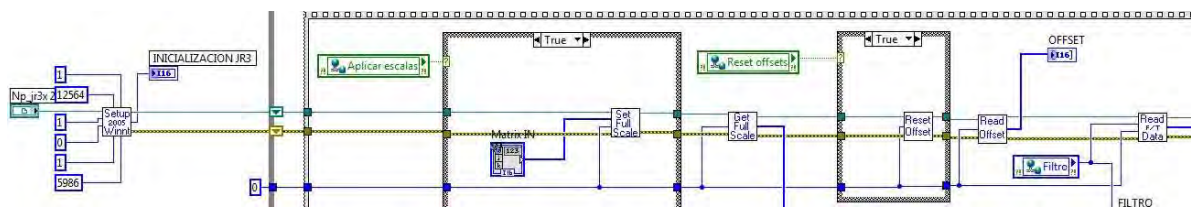


Figura 4.59: Parte del diagrama de bloques en detalle del sensor fuerza/par JR3 en la estación esclava.

Todos los *VI*s utilizados en la figura anterior, son de una biblioteca especialmente diseñada para trabajar con el sensor JR3. Gracias a ellos, se puede inicializar, leer y cambiar las escalas, *offsets*, filtros, etc. Ello requirió un especial estudio previo del diseño y funcionamiento de estos *VI*s.

Esta lógica, lleva asociada su propia parte visual, que será mostrada en la pantalla del PC Esclavo con la siguiente interfaz (Figura 4.60)

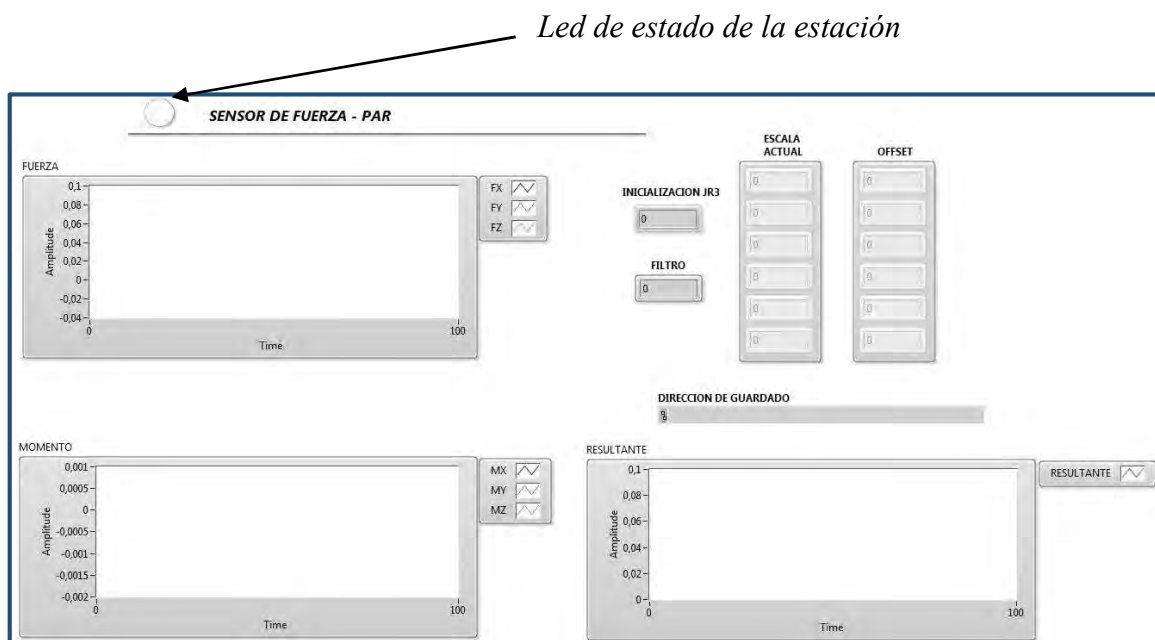


Figura 4.60: Panel frontal del sensor fuerza/par JR3 en la estación esclava.

Como se puede comprobar, se mostraran los datos en tiempo real de las fuerzas, los momentos y la resultante medida en el sensor cuando sea activado por la estación maestra. Igualmente se puede visualizar la configuración de la dirección de guardado, escalas, filtros y *offsets* controlados por el operador vía *network* en el PC principal. Un pequeño led en esta pantalla, que se ubica en la parte izquierda del título, servirá al operador de información para conocer el estado actual de la estación esclava, según el código mostrado en la figura 4.61:



Figura 4.61: Código de colores de estado asociado a la interfaz del sensor JR3 en la estación esclava: Parado (rojo), ámbar (Conectado y a la espera de una orden del PC Maestro) y verde (leyendo).

4.8 Gestión de errores

Otra parte fundamental, sobre todo en aquellos trabajos que tienen un fin experimental, es la gestión de los errores que puedan presentarse en el sistema a lo largo de los diferentes ensayos. Es por ello, que el programa diseñado contiene herramientas de depuración para ayudar a identificar las áreas problemáticas y poder realizar los cambios adecuados. El operador podrá encontrar *bugs* de *software* que generan malos resultados o comportamiento incorrecto. Para ello, se utilizan *clusters* de *error out* que incluyen los siguientes componentes de información:

- *Status*: es un valor *Booleano* que reporta *TRUE* si ocurre un error.
- *Code*: es un entero con signo de 32 bits que identifica el error de forma numérica. Un código de error no igual a cero unido a un estatus *FALSE* emite una advertencia más que un error.
- *Source*: es una cadena de caracteres que identifica donde ocurrió el error.

Conforme el programa se ejecute, LabVIEW realizará pruebas de errores en cada nodo de ejecución. Si se detecta un error, al final del flujo de ejecución, el *software* reportará el error. Así pues, el operador accederá de manera automática a una pantalla diseñada especialmente para este fin, en caso de detectarse un error (Figura 4.62).

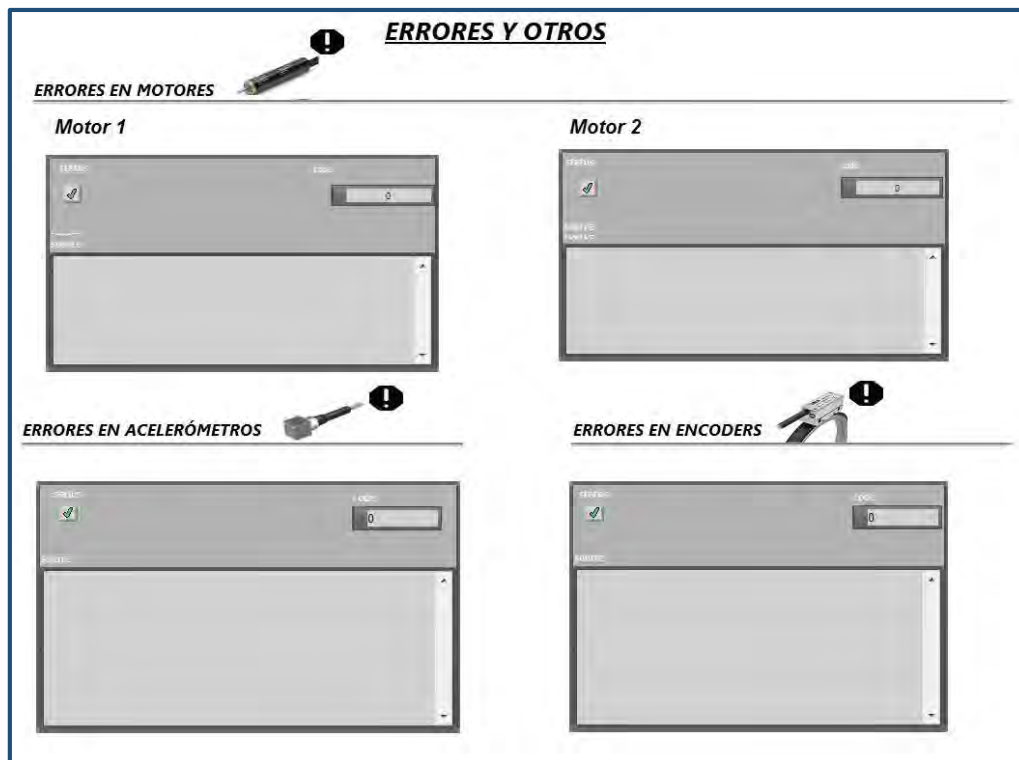


Figura 4.62: Código de colores de estado asociado a la interfaz del sensor JR3 en la estación escalaba: Parado (rojo), ámbar (Conectado y a la espera de una orden del PC Maestro) y verde (leyendo).

Un ejemplo, de lo que se visualizaría en caso de error, se muestra en la figura 4.63, pudiendo identificar de manera sencilla el error mediante su código y descripción.

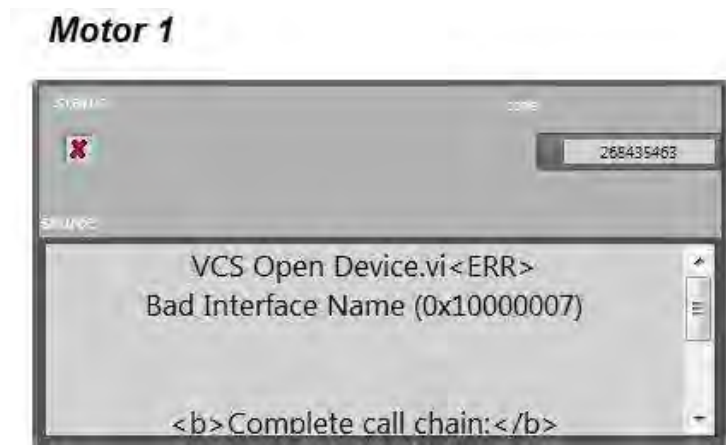


Figura 4.63: Ejemplo de visualización de error detectado.

Como en la gran mayoría de proyectos experimentales, existe la posibilidad de que puedan surgir errores inesperados que muchas veces no tienen fundamento. Esto es una parte inherente a sistemas diseñados como prototipos, como es el caso de este trabajo. Para solventar estos casos, el software provee al operador de la capacidad de eliminar

dichos errores, reiniciando los dispositivos y pudiendo continuar con los ensayos bajo su responsabilidad. El botón denominado “limpieza de errores” situado en el menú principal, proporciona esta función (Figuras 4.64 y 4.65).

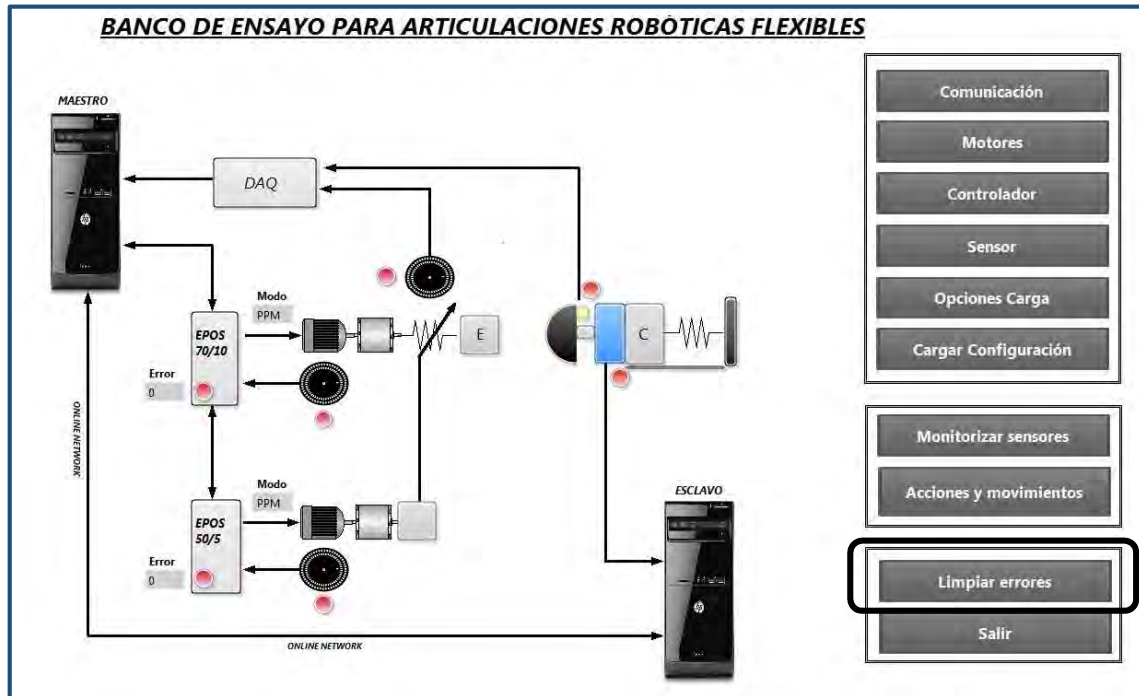


Figura 4.64: Panel frontal del menú principal donde se puede observar el botón para la limpieza de errores.

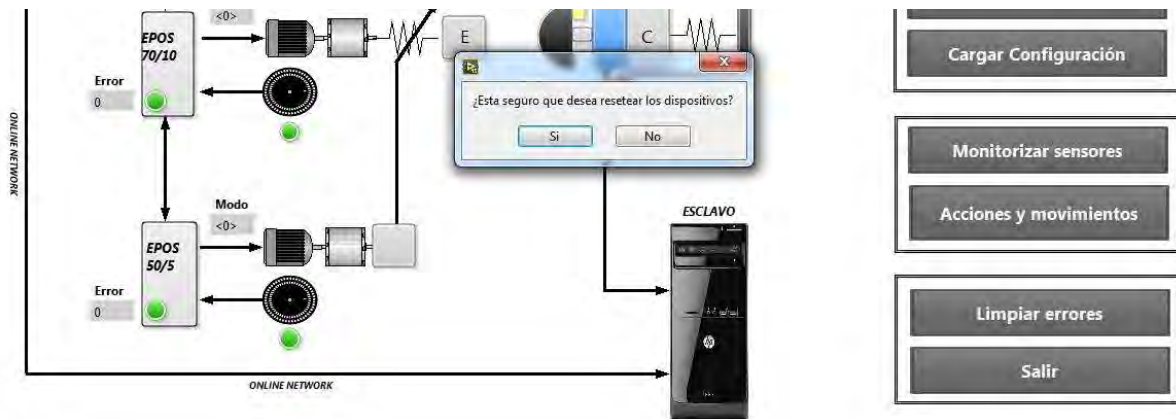


Figura 4.65: Aviso mostrado al operador para confirmar la limpieza de errores.

Esto es posible gracias al *VI VCS Reset Device*, el cual se utiliza mediante el esquema de bloques mostrado en la figura 4.66.

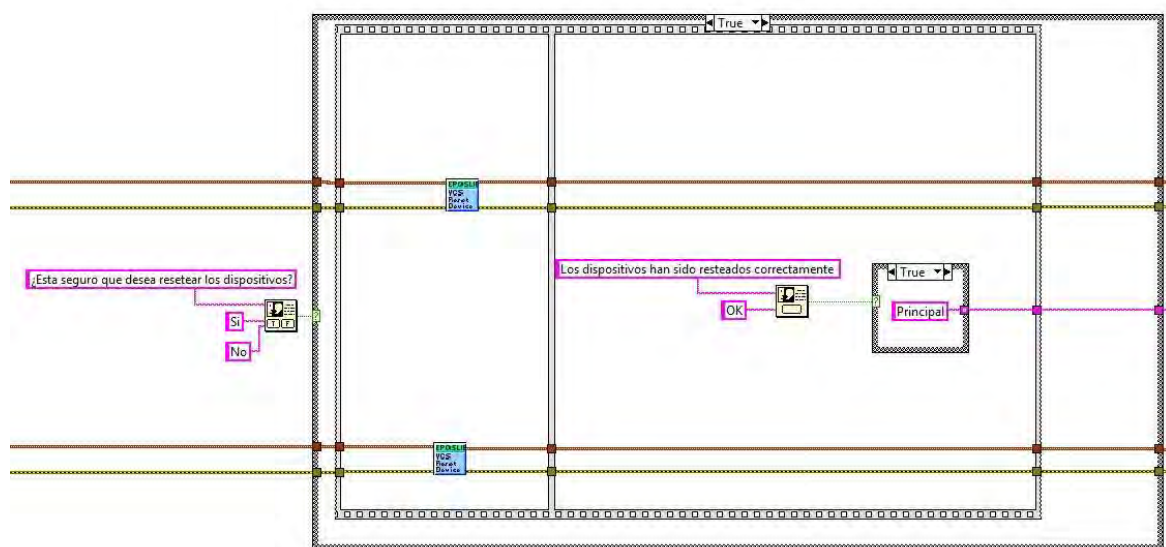


Figura 4.66: Diagrama de bloques para la limpieza de errores.

4.9 Protocolo de puesta en marcha

Para el uso del banco, con el sensor de fuerza/par JR3, es muy importante realizar una serie de operaciones previas al encendido de todo el sistema. Sin estos pasos, el sensor no se iniciará y por tanto la estación esclava presentará errores a la hora de comenzar la monitorización. Es por ello que se debe seguir el siguiente protocolo:

- i. La comunicación inicial, debe hacerse mediante un *software* de interfaz, especialmente diseñado para este sensor denominado *jr3pci* (Figura 4.67). Este permite la inicialización para su posterior uso en el HMI de LabVIEW si así se requiriera.



Figura 4.67: Icono del software-interfaz para inicializar el sensor JR3, previo a LabVIEW.

- ii. Como se puede ver en la figura 4.69, en primer lugar se debe identificar el “*vendor ID*”, que se elegirá por defecto como 1762. “*Device ID*” debe ser leído en el identificador de la tarjeta PCI que interactúa con el sensor (Figura 4.68).

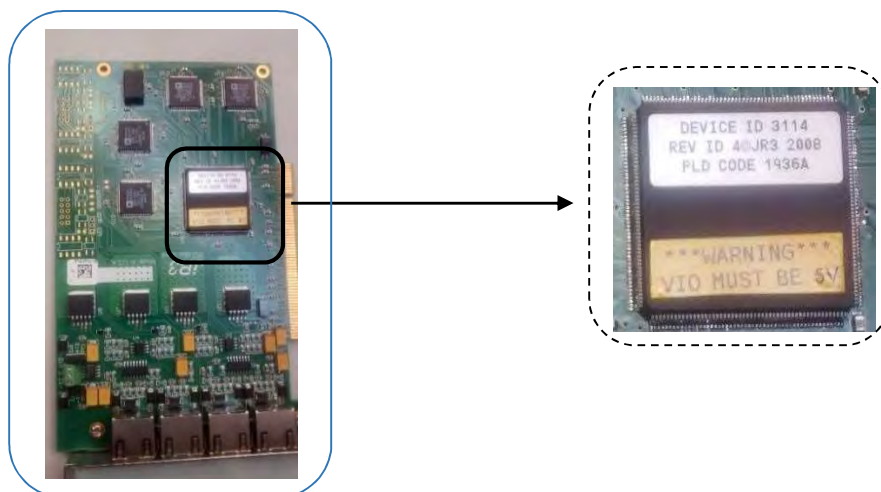


Figura 4.68: Identificación de Device ID en la tarjeta PCI.

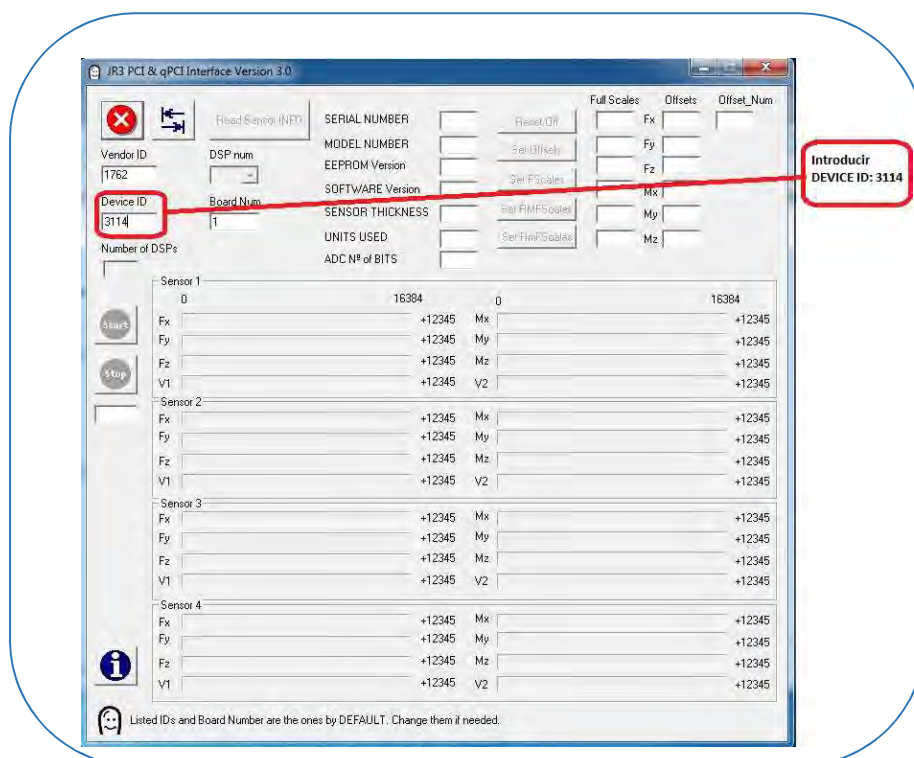


Figura 4.69: Introducción de Device ID en software-interfaz jr3pci.

- iii. Tras ello, se debe presionar en el botón “*Download DSP CODE*” para establecer una primera lectura de identificación del sensor (Figura 4.70).

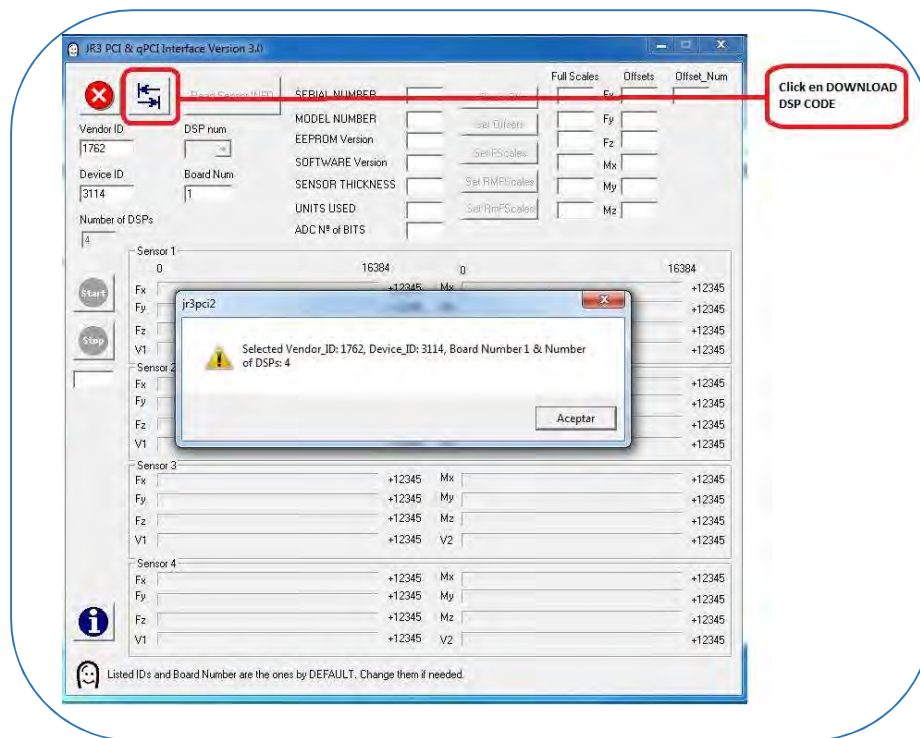


Figura 4.70: Download DSP CODE en software-interfaz jr3pci.

- iv. Llevado a cabo este primer reconocimiento del tipo de sensor, se procede a la lectura más específica de los parámetros de configuración de fábrica del sensor, como son el número de serie, modelo, *software*, etc., así como las escalas y *offset* preestablecidos por el fabricante para ese modelo. Para ello, presionar en el botón “Read Sensor INFO” (Figura 4.71).

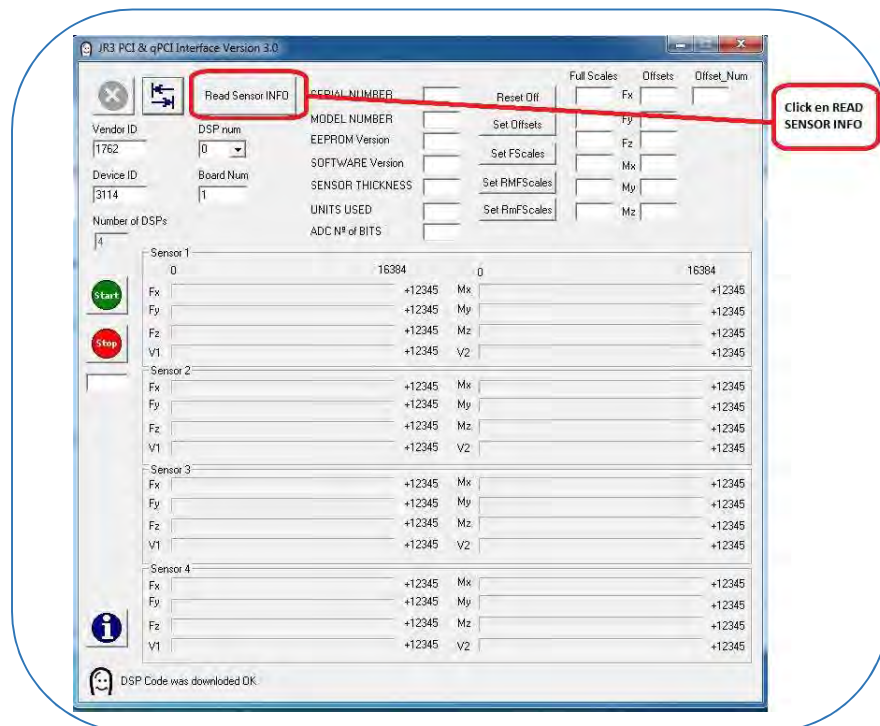


Figura 4.71: Read Sensor INFO en software-interfaz jr3pci.



- v. Se describirán a continuación los parámetros más importantes a tener en cuenta (Figura 4.72):
- *UNITS USED*: Tipo de unidad de referencia en las lecturas. Se definen cuatro posibilidades:
 - 0 – lbs, in-lbs, mils → lbs, inches • lbs y inches • 1000
 - 1 – N, dNm, mmX10 → Newtons, Newtons • metros • 10 y mm • 10
 - 2 – kgF, kgFcm, mmX10 → Kilogramos-Fuerza, Kilogramos-Fuerza • cm y mm • 10
 - 3 – klbs, kin-lbs, mils → 1000 lbs, 1000 inches • lbs y inches • 1000
 - *RESET OFF*: Se eliminará el *offset* presente en las lecturas actuales.
 - *SET OFFSETS*: Se introducirán los *offsets* leídos en la columna ‘*Offsets*’.
 - *SET FSCALES*: Se introducirán las escalas leídas en la columna ‘*Full Scales*’.
 - *SET RMFSCALES*: Se leerá la máxima escala recomendada por el fabricante, definida como: “*Aquella con la que no se pierde resolución*”.
 - *SET RmFSCALES*: Se leerá la mínima escala recomendada por el fabricante, definida como: “*Aquella con la que no se produce saturación en las lecturas prematuramente*”.
 - *OFFSET_NUM*: *Offset* de corriente. Es establecido automáticamente por la interfaz.

***NOTA:** *MODEL NUMBER*. Actualmente el número de modelo NO se corresponde con los números de modelo proporcionados por JR3, pero, se proporciona un único identificador para cada sensor.

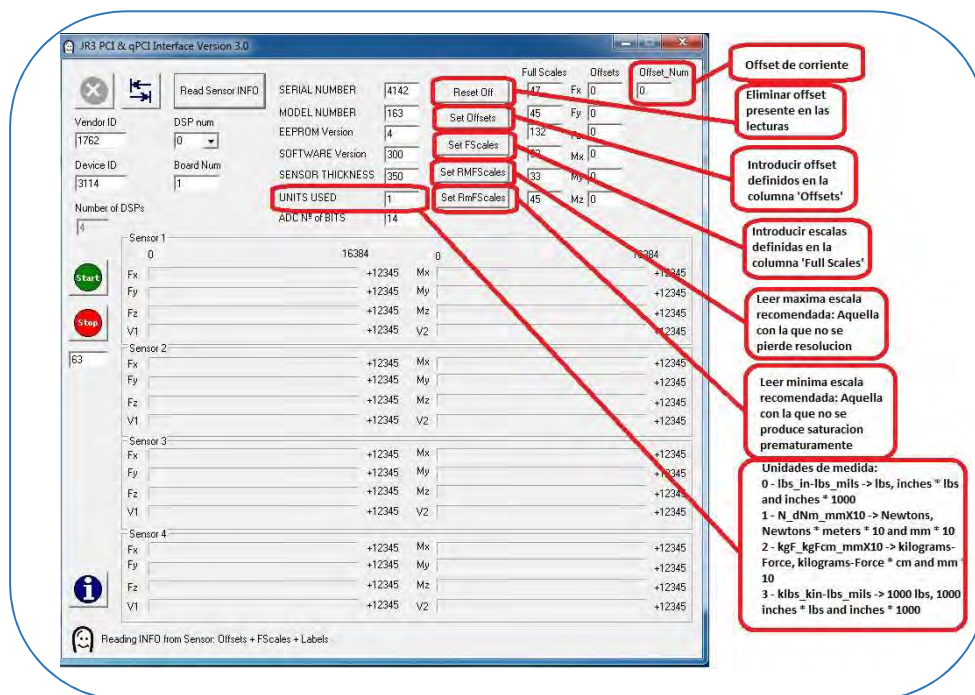


Figura 4.72: Parámetros en software-interfaz jr3pci.

- vi. Se ha finalizado la comunicación e identificación del dispositivo, por tanto se puede proceder a realizar las lecturas necesarias (Figura 4.73).

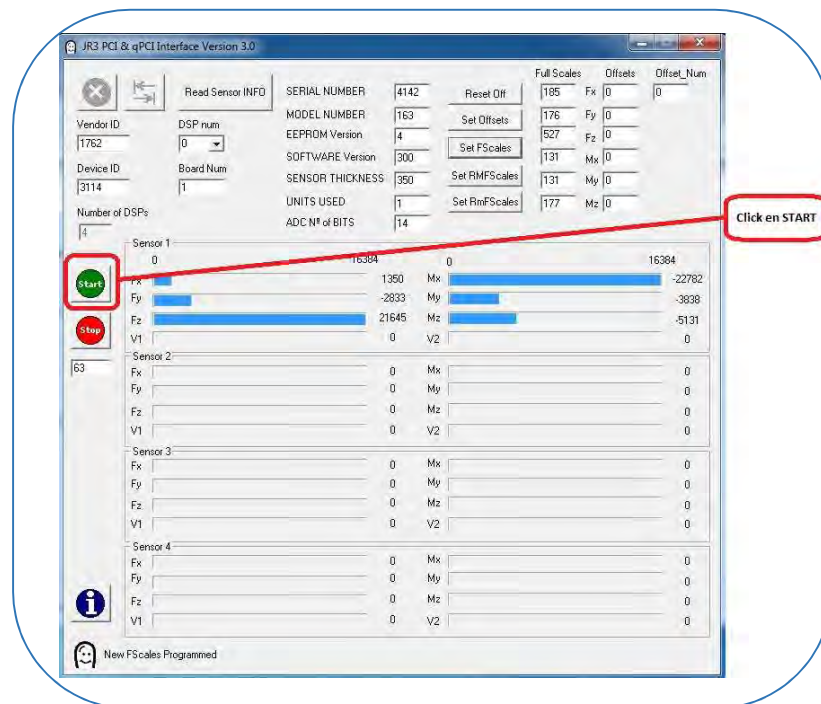


Figura 4.73: Lecturas del sensor en software-interfaz jr3pci.



vii. Lecturas del sensor

Este apartado es de vital importancia, ya que, las lecturas proporcionadas por la interfaz no son de interpretación directa. Es decir, los valores mostrados no son directamente los valores de fuerzas y momentos ejercidos. Para ello se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- *ADC N° of BITS*: Numero de bits utilizados en las lecturas. Por defecto son 14 bits, cuyo valor decimal es: $2^{14} = 16384$
- *Full Scales*: Valores de “Full Scales” para cada fuerza y cada momento concreto, con los que se están realizando las mediciones.
- Valor numérico de la lectura: Valor mostrado.

Para poder realizar una correcta medida en el valor deseado (*S.I.: Newton*) habrá que realizar la siguiente operación:

$$\frac{\text{Valor de lectura} \cdot \text{Valor de 'Full Scale'}}{16384}$$

para el caso de medida de fuerzas (F_x , F_y , F_z),

$$\frac{\left(\frac{\text{Valor de lectura} \cdot \text{Valor de 'Full Scale'}}{16384} \right)}{10}$$

para el caso de medida de momentos (M_x , M_y , M_z), puesto que este valor viene multiplicado por 10 en las lecturas.

Una vez concluidos estos pasos, es posible utilizar la estación esclava para su interacción con el sensor JR3.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Introducción

Una vez finalizado el desarrollo del *software*, el banco estaba operativo para realizar los ensayos pertinentes que confirmaran que el actuador instalado estaba siendo controlado según las especificaciones del operador, y que se podían configurar, adquirir y monitorizar todos los datos procedentes de los diferentes instrumentos de medida.

AVASST fue el actuador elegido para ser instalado y probado durante estos *test*.

Una vez comprobada la viabilidad y el correcto funcionamiento de todo el banco, se intercambi6 el actuador AVASTT por MMJS.

Así pues, este último prototipo fue el seleccionado para realizar los ensayos de impacto con el fin de estudiar sus beneficios como sistema de reducción del daño producido en una colisión accidental humano-robot.

Con estos objetivos y, a lo largo de este capítulo, se detallarán los ensayos llevados a la práctica, así como sus resultados.

5.2 Ensayos con AVASTT

5.2.1 Control a bajo nivel

5.2.1.1 Control de posición

Alcance de una posición definida por el operador mediante modo PPM

El operador carga una configuración de controlador para el motor principal de *Profile Position Mode (PPM)*. A través del HMI de control, se exige a dicho motor que realice un control de posición hasta alcanzar los 30°; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.1.

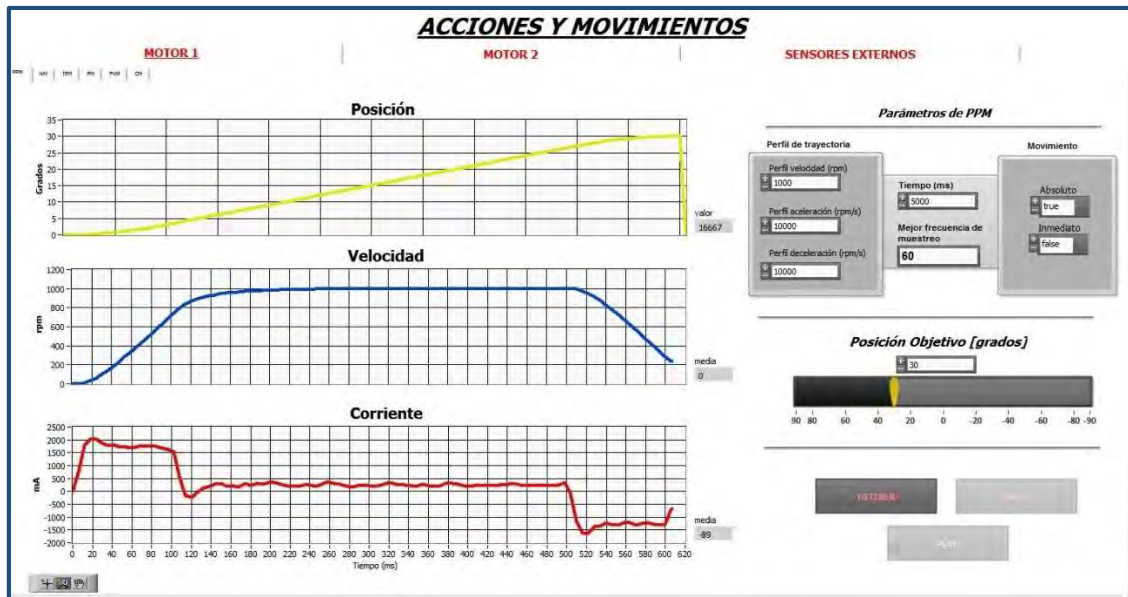


Figura 5.1: Lecturas del ensayo de control de posición PPM.

Como se puede observar en la gráfica de posición (amarillo), el motor está inicialmente posicionado en 0° y realiza una trayectoria hasta alcanzar los 30° definidos por el operador en el selector de la posición objetivo.

El gráfico de velocidad (azul) indica que el motor ha acelerado en los primeros momentos siguiendo el perfil de aceleración establecido, hasta alcanzar el perfil de velocidad máxima definido por el operador (1.000 rpm). Una vez alcanzado, mantendrá esa velocidad máxima siempre que no se haya alcanzado el objetivo de posición. Se observa que cuando la posición del motor es ya muy cercana a los 30° , la velocidad descende siguiendo el perfil de deceleración, con el objetivo de realizar un control más fino de la posición.

Por último, el gráfico de corriente (rojo) corresponde con el comportamiento esperado. Cuando el motor acelera para alcanzar la velocidad máxima, se produce un pico de corriente. Posteriormente, dicha corriente se mantiene estable ya que la velocidad también lo es. Y en último lugar, cuando se ejecuta una deceleración, se observa un corriente pico inversa.

Por tanto, de este ensayo puede desprenderse que el control en posición en modo PPM responde perfectamente a lo esperado, teniendo un comportamiento acorde con la idea de diseño.

Alcance de una posición definida por el operador mediante modo PM

El operador carga una configuración de controlador para el motor principal de *Position Mode (PM)*. A través del HMI de control, se exige a dicho motor que realice un control de posición en modo DC hasta alcanzar 30.000 *qc*; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.2.

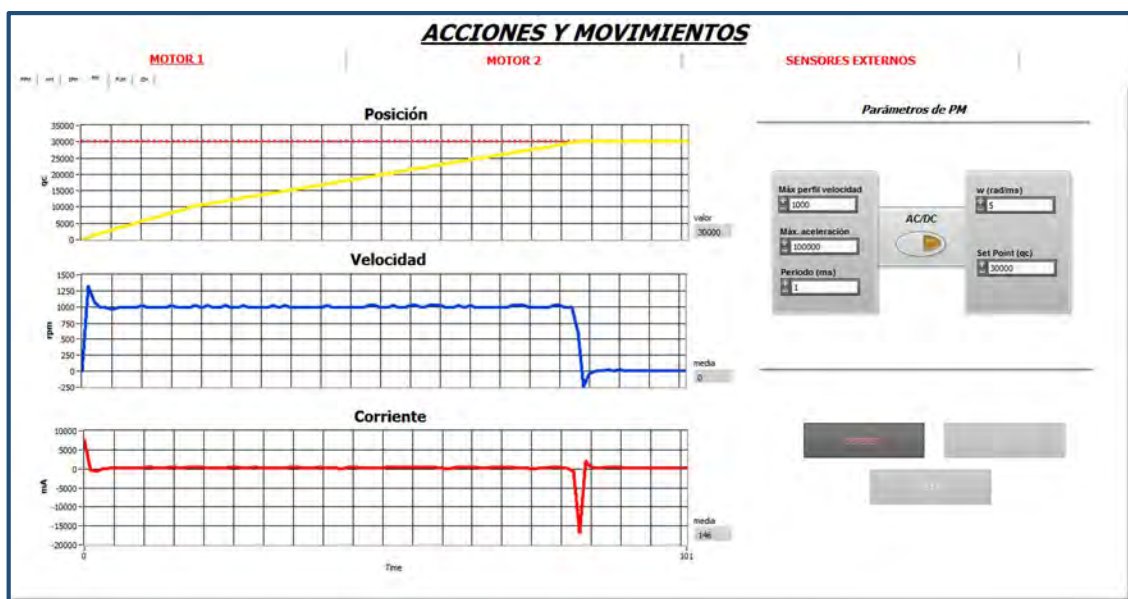


Figura 5.2: Lecturas del ensayo de control de posición PM-DC.

Para este ensayo, la gráfica de posición muestra que el motor está inicialmente posicionado en 0° y, finalmente, consigue alcanzar los 30.000 qc definidos previamente por el operador a través del parámetro denominado *Set Point*.

El gráfico de velocidad indica que el motor ha acelerado bruscamente en los primeros momentos, hasta alcanzar el perfil de velocidad máxima introducido por el operador (1.000 rpm). Una vez alcanzado, mantiene esa velocidad máxima siempre que no se haya alcanzado el objetivo de posición. Se observa consecuentemente una deceleración abrupta sólo cuando ha sido alcanzada la posición objetivo. Es decir, se ha conseguido alcanzar de la posición acelerando y decelerando al máximo de capacidad, sin generar una trayectoria de control, como en el caso del ensayo anterior con PPM. Precisamente este comportamiento brusco, caracteriza el control mediante PM.

Por último, el gráfico de corriente corresponde con el comportamiento esperado. Cuando el motor acelera para alcanzar la velocidad máxima, se produce un pico de corriente inicial destacado. Posteriormente, la mencionada corriente se mantiene estable ya que la velocidad también lo es. Y en último lugar, cuando se produce una deceleración, se observa un pico de corriente inversa bastante abrupto.

Por tanto, de este ensayo se concluye que el control en posición en modo PM responde correctamente a lo esperado, teniendo un comportamiento acorde con la idea de desarrollo previa.

Seguimiento de una señal sinusoidal en modo PM

Al igual que en el ensayo previo, el operador carga una configuración de controlador para el motor principal de *Position Mode (PM)*. A través del HMI de control, se exige a dicho motor que realice un control de posición en modo AC, lo que implica que se siga una señal sinusoidal generada por el propio sistema; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.3.

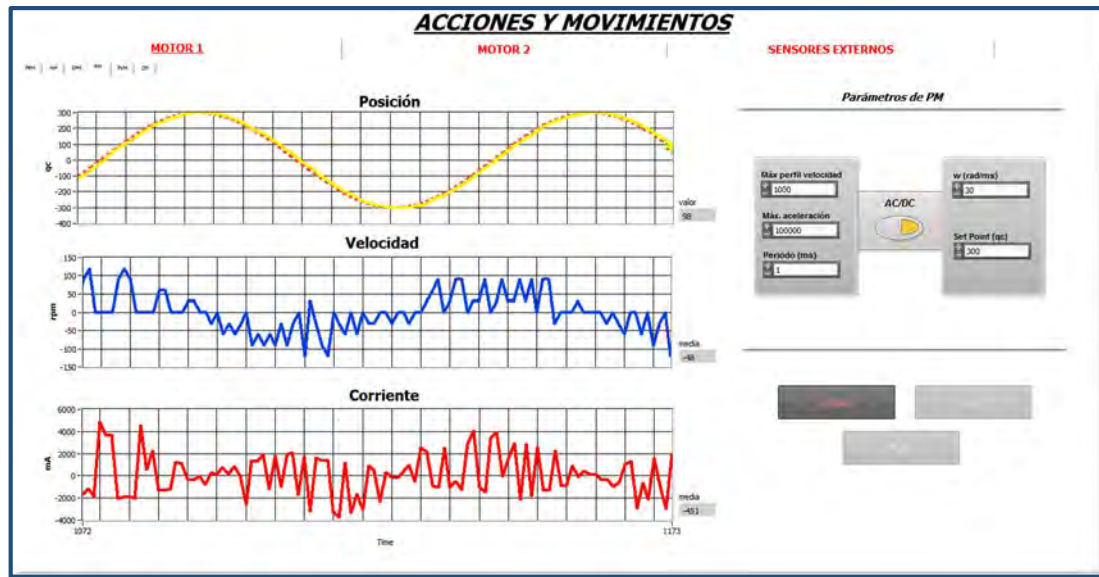


Figura 5.3: Lecturas del ensayo de control de posición PM-AC.

Tal y como se muestra en la gráfica de posición, el motor sigue en todo momento y de manera continuada la señal sinusoidal de amplitud 300 qc, definida previamente por el operador a través del parámetro denominado *Set Point*. Esta señal sinusoidal está formada por una considerable cantidad de puntos intermedios, que serán los puntos objetivo a alcanzar en cada momento, consiguiendo finalmente una forma de senoide.

El gráfico de velocidad indica que el motor acelera y decelera bruscamente para alcanzar cada punto objetivo. Al igual que en el ensayo previo, se están alcanzando las posiciones llevando la aceleración y la velocidad del motor al máximo de sus posibilidades, sin generar una trayectoria de control tan fina como en PPM.

Por último, el gráfico de corriente tiene coherencia con el comportamiento mostrado. El motor sufre picos de corriente al acelerar y decelerar con cada punto intermedio. Tanto en la gráfica de velocidad, como la gráfica de corriente, se puede observar un cierto comportamiento sinusoidal, que indica que el control se está realizando correctamente.

Por tanto, este ensayo se califica igualmente como exitoso al comprobar que el control en posición en modo PM responde perfectamente a lo esperado, teniendo un comportamiento acorde con el control implementado previamente.

Control de posición por interpolación de puntos en modo IPM

El operador realiza la carga de la configuración del controlador para el motor principal de *Interpolated Position Mode (IPM)*. A través del HMI de control, se exige a al motor que realice un control de posición mediante la generación de trayectoria e interpolación de posiciones intermedias en modo S, que implica que se siga una señal sinusoidal generada por el propio sistema; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.4.

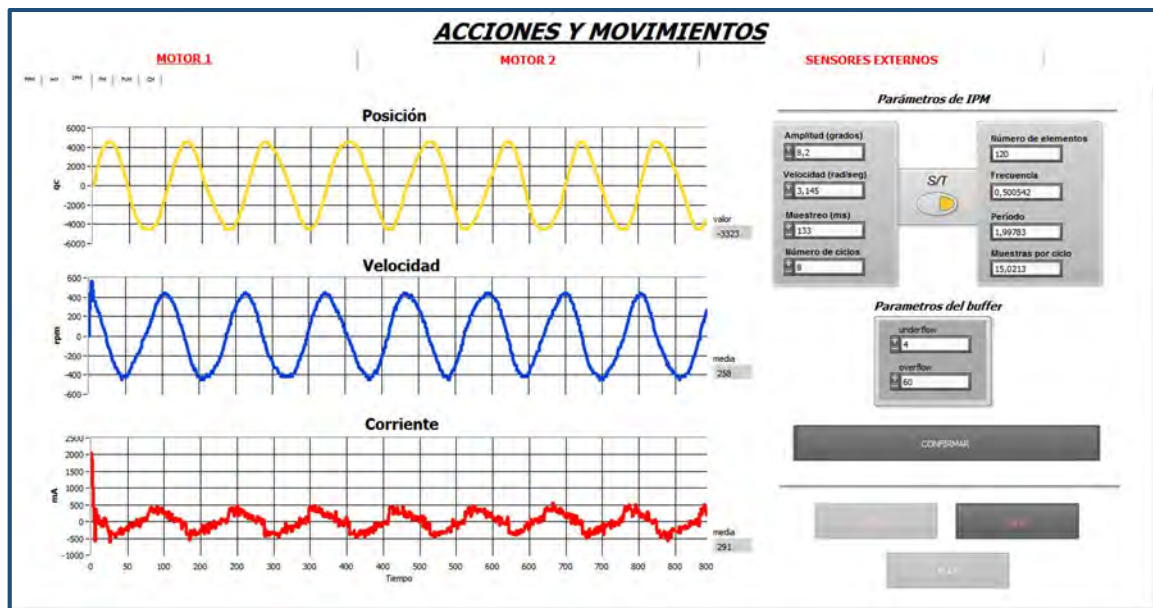


Figura 5.4: Lecturas del ensayo de control de posición IPM.

Nuevamente en la gráfica de posición, se observa perfectamente como el motor está realizando el seguimiento de una señal sinusoidal generada por la interpolación de una nube de puntos intermedios.

El gráfico de velocidad muestra que el motor acelera y decelera acorde con la señal de posición. Este modo sí que genera trayectorias, lo que implica un control más suave, que puede ser observado en la forma de la onda de velocidad. Se está produciendo una aceleración suave para alcanzar el punto intermedio, y una deceleración suave una vez que se ha alcanzado. Si estos cambios de aceleración se realizan de manera constante para alcanzar los sucesivos puntos, el resultado es una forma de onda sinusoidal prácticamente perfecta en velocidad, pero que si se aprecia detalladamente, cuenta con pequeños “arcos” producto del alcance de los mencionados puntos intermedios.

Por último, el gráfico de corriente corresponde con el comportamiento comentado. En éste se puede observar de una manera más clara, el concepto de puntos intermedios. Se observan pequeños picos de corriente que son el resultado de alcanzar los sucesivos objetivos intermedios que conforman toda la onda sinusoidal de posición.

Compárese este ensayo en modo IPM con el ensayo previo en modo PM. En ambos casos, se está siguiendo un senoide, pero el concepto de control por generación de trayectoria es muy evidente para IPM. Todos los datos monitorizados muestran un comportamiento mucho más controlado que para PM. De ahí precisamente, el que no se recomiende el uso de PM por su poca fiabilidad para realizar seguimientos largos de este tipo, que puedan incurrir en errores.

Por tanto, de este ensayo puede desprenderse que el control en posición en modo IPM responde perfectamente a lo esperado, teniendo un comportamiento acorde con la idea de diseño.

Control de posición en modo HM - Current Thresold Positive Speed & Index

El operador carga una configuración de controlador para el motor principal de *Homing Mode (HM)*. A través del HMI de control, se exige a dicho motor que establezca el origen o cero del sistema de posicionamiento tras haber encontrado un pico de corriente. El sistema debe seguir los pasos mostrados en la figura 5.5.

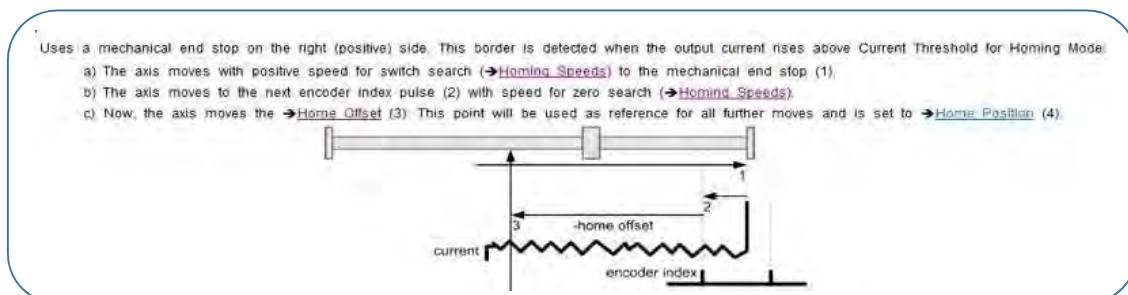


Figura 5.5: Método HM - Current Thresold Positive Speed & Index.

Como se ilustra en la figura previa, se debe definir la velocidad de búsqueda del tope mecánico, la velocidad de búsqueda del índice del encoder y el límite de corriente.

El motor girará en sentido antihorario hasta encontrar un tope mecánico (1). En ese momento, el motor empujará hasta aplicar la máxima corriente definida como límite por el operador. Una vez alcanzado dicho límite, el sistema buscará el índice del encoder (2). Por último, el motor se moverá aplicando el *offset* de posición correspondiente (3).

En el ensayo realizado se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la figura 5.6



Figura 5.6: Lecturas del ensayo de control de posición HM.

El gráfico de velocidad indica que el motor acelera según el parámetro denominado “Aceleración homing” establecido en 3.000 rpm/s. Posteriormente se alcanza la velocidad de búsqueda del tope mecánico definido en 500 rpm. Es el momento de fijarse en la gráfica de corriente, donde se puede observar un gran pico de corriente. Esto indica que el motor ha encontrado el tope mecánico y ha empujado contra él hasta alcanzar la corriente límite previamente fijada por el operador en 3.000 mA. Esta reacción también es observable en la gráfica de velocidad, ya que al mismo tiempo que se produce el pico de corriente mencionado, se ejecuta una bajada de velocidad.

En ese momento, tras haber alcanzado el límite de corriente, el motor busca el índice del encoder (posición 0; esto no es visible en la gráfica), y tras encontrarlo, se aplica el *offset* definido en “Distancia tope al inicio” de 2.300 qc.

Es por ello, que la gráfica de posición muestra que el motor ha ejecutado un movimiento desde el inicio hasta una posición en el cual se ha encontrado el tope mecánico, y posteriormente, tras recalibrar el encoder, se ha desplazado hasta una posición final de 2.300 qc.

Al igual que en los casos anteriores, el control en posición en modo HM se ejecuta según lo esperado, observándose un comportamiento según el diseño *software*.

5.2.1.2 Control de corriente

Control en corriente a través del modo CM - Aleatorio

El operador carga una configuración de controlador para el motor principal de *Current Mode (CM)*. A través del HMI de control, se exige a dicho motor que realice un

control de corriente mediante el modo A, que implica el seguimiento de una señal de corriente aleatoria generada por el sistema; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.7.

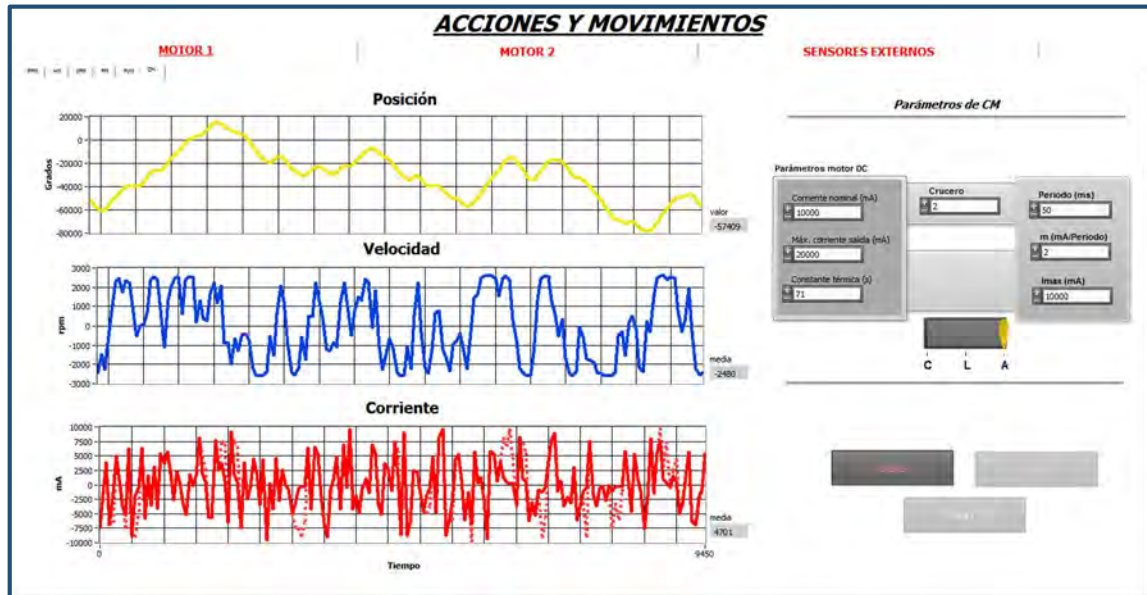


Figura 5.7: Lecturas del ensayo de control de posición CM-A.

Lo primero que se debe observar al realizar este ensayo son las lecturas de corriente. Como muestra la figura previa, el motor está realizando el seguimiento en corriente de una señal aleatoria (señal roja punteada).

En este ensayo, los gráficos de velocidad y posición no tienen tanta importancia, ya que solo muestran los cambios que el control de corriente le está ordenando. De esta manera, cuando se produce un pico de corriente positivo, la velocidad aumenta y la posición también. En caso de que el pico sea inverso, la velocidad y la posición reaccionan de manera inversa.

Es importante destacar, que la señal aleatoria está siempre dentro de los límites marcados por el operador, mediante el parámetro “*Imáx*”.

Por tanto, en este ensayo, y al igual que los anteriores, se corrobora que el comportamiento en modo CM-A responde en todo momento a lo definido por el operador, manteniendo un control en corriente que responde al diseño *software* desarrollado.

Control en corriente a través del modo CM - Lineal

De la misma manera que en el ensayo anterior, el operador vuelve a cargar una configuración de controlador para el motor principal de *Current Mode (CM)*. A través del HMI de control, se exige a dicho motor que realice un control de corriente mediante el

modo L, que implica el seguimiento de una señal de corriente lineal generada por el sistema; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.8.

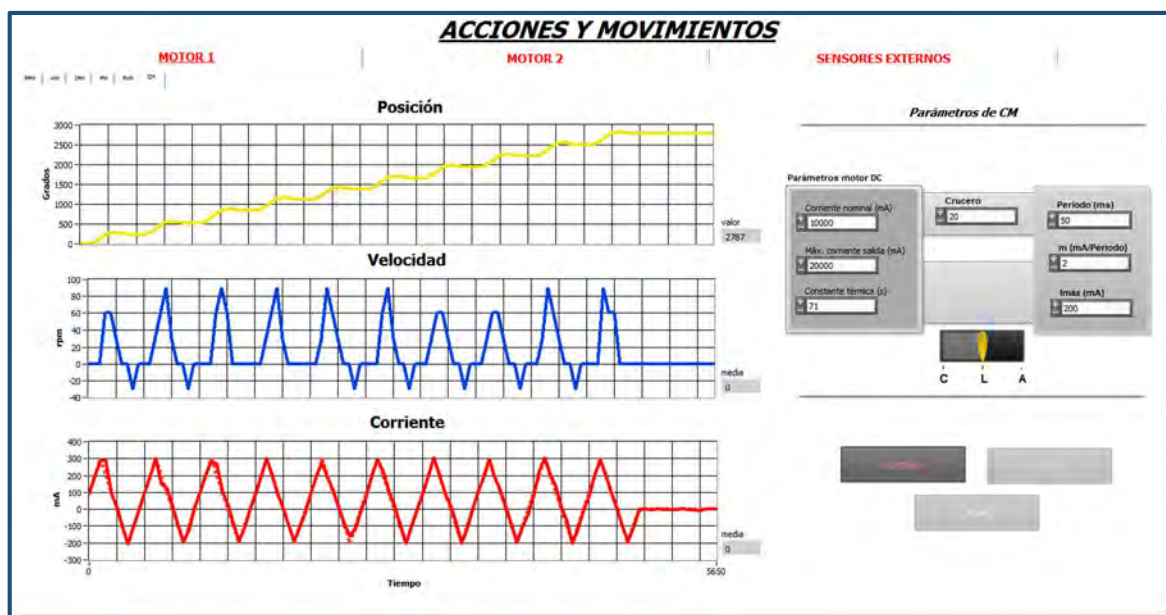


Figura 5.8: Lecturas del ensayo de control de posición CM-L.

Como se puede observar en la gráfica de corriente, el motor está realizando el seguimiento en corriente de una señal lineal ascendente y descendente (señal roja punteada).

Al igual que en el ensayo previo, los gráficos de velocidad y posición responden ante los cambios que el control de corriente les está ordenando. De esta manera, cuando aumenta linealmente la corriente, la velocidad aumenta vertiginosamente y se alcanza una posición mayor. Cuando la corriente está en el tramo descendente, la velocidad cae abruptamente, llegando incluso a valores negativos que implican un pequeño retroceso en la gráfica de posición.

Es importante destacar, que al igual que antes, la señal lineal de corriente siempre se mantiene dentro de los límites marcados por el operador de 200 mA.

Por tanto, este ensayo ha sido igualmente satisfactorio.

Control en corriente a través del modo CM - Constante

De nuevo, el operador carga una configuración de controlador para el motor principal de *Current Mode (CM)*. A través del HMI de control, se exige a dicho motor que realice un control de corriente mediante el modo C, que implica el seguimiento de un valor constante de corriente definido previamente; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.9.

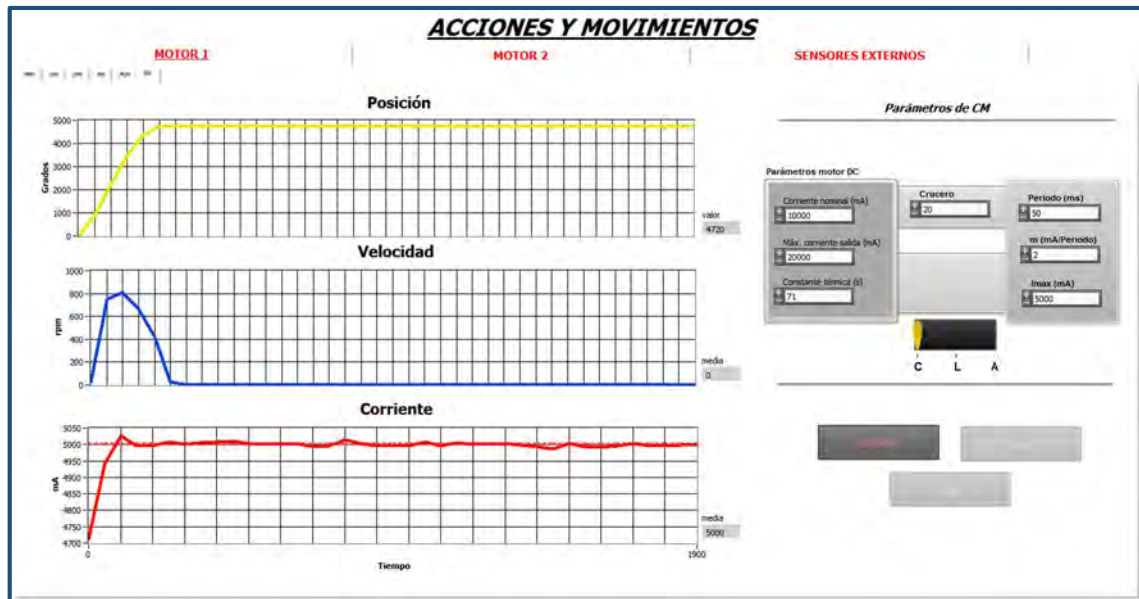


Figura 5.9: Lecturas del ensayo de control de posición CM-C.

Al igual que en los dos ensayos previos ya comentados, se puede observar en el gráfico de corriente como el motor está realizando el seguimiento del valor establecido por el operador, que en este caso fue de 5.000 mA.

Los gráficos de velocidad y posición continúan bajo el mando del control de corriente. Así pues, se observa que durante el pico inicial de corriente, la velocidad aumenta significativamente, al igual que la posición. Una vez estabilizado el valor de corriente, el motor mantiene ese empuje sin aumentarlo, y la fuerza de fricción aparece para disminuir la velocidad del motor hasta pararlo. La grafica de posición corrobora lo mencionado, ya que se observa un cambio de posición cuando se produce el pico de corriente y el aumento de la velocidad. Cuando la fricción produce un valor de velocidad nulo, la posición consecuentemente no cambia.

Al igual que en los dos ensayos de corriente anteriores, puede desprenderse que el control en corriente en modo CM-C responde perfectamente a lo esperado, teniendo un comportamiento acorde con la idea de diseño.

5.2.1.3 Control de velocidad

Control de velocidad a través del modo PVM - DC

El operador ejecuta una carga de la configuración del controlador para el motor principal de *Profile Velocity Mode (PVM)*. A través del HMI de control, se exige a dicho motor que realice un control de velocidad mediante el modo DC, que implica que el motor alcance una consigna de velocidad definida por el operador; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.10.

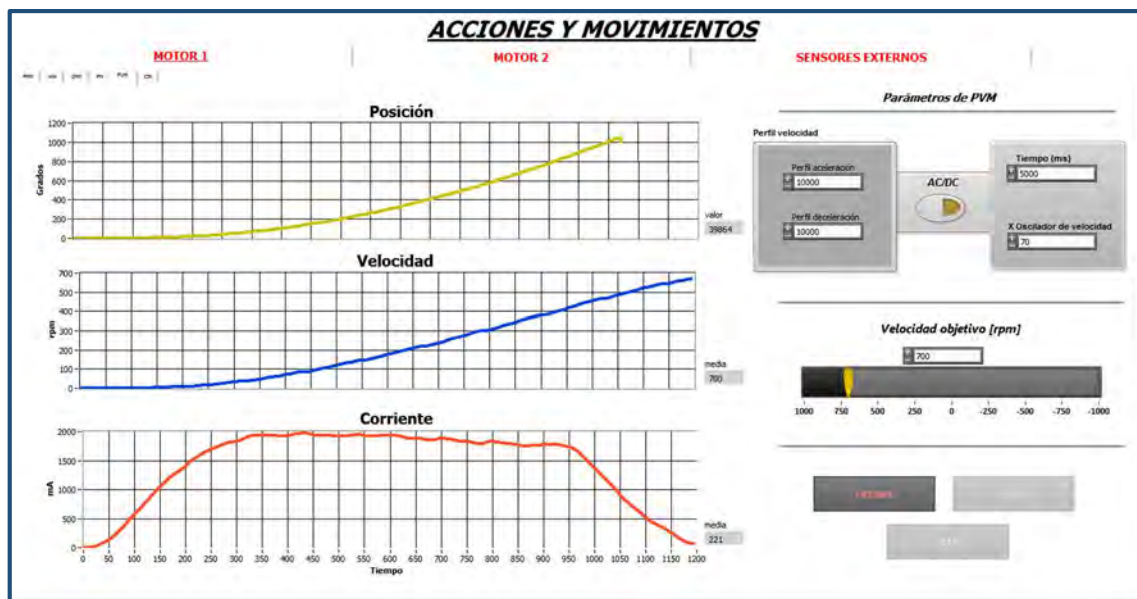


Figura 5.10: Lecturas del ensayo de control de posición PVM-DC.

El gráfico de velocidad revela que el motor acelera según el perfil de aceleración seleccionado, que en este caso se establece en 10.000 rpm/s. Tal y como se observa, se realiza un control suave para alcanzar la velocidad objetivo definida por el operador en 700 rpm. Precisamente, la forma de pendiente de la velocidad indica que se está realizando el control en velocidad con generación de trayectoria. Esta es una de las características destacadas de PVM. Si no se realizara dicha generación, se observaría un pico abrupto de velocidad parecido a los observados en los ensayos con PM.

Los gráficos de posición y corriente responden coherentemente al control de velocidad ejercido. Por un lado, la corriente aumenta suavemente para conseguir un aumento de velocidad en el motor. Una vez alcanzado el perfil máximo de aceleración, la corriente se mantiene constante. Por último, cuando la velocidad objetivo está próxima a alcanzarse, la corriente disminuye suavemente para conseguir un control de velocidad más preciso.

En cuanto al gráfico de posición, se observa una mayor o menor pendiente dependiendo de la aceleración que se está aplicando en cada momento. Es por ello, que en los momentos iniciales, cuando la velocidad es baja, la posición aumenta levemente. En cambio, en los momentos centrales, cuando la velocidad aumenta en mayor medida, se puede observar un desplazamiento de la posición más acusado.

Por tanto, en este ensayo de velocidad ejecutado en modo PVM-DC, confirma el comportamiento esperado; y por lo tanto, el control que se realiza por parte del sistema es satisfactorio.

Control de velocidad a través del modo PVM - AC

El operador carga de nuevo una configuración de controlador para el motor principal de *Profile Velocity Mode (PVM)*. A través del HMI de control, se exige a dicho motor que realice un control de velocidad mediante el modo AC, que implica el que en primer lugar el motor alcance el valor positivo definido por el operador y posteriormente, el mismo valor pero con signo negativo; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.11.

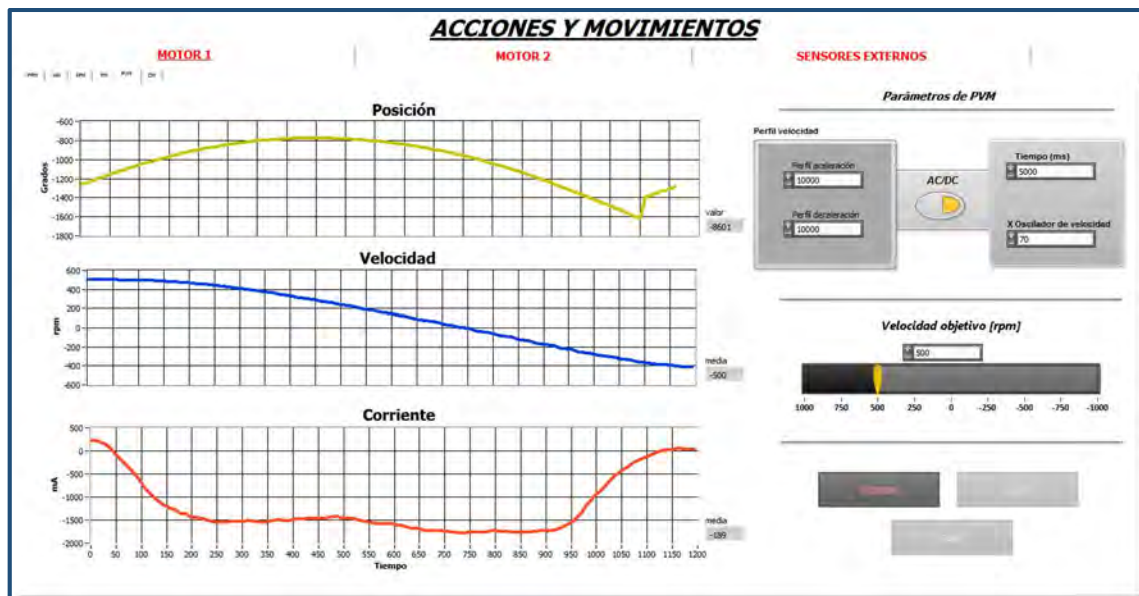


Figura 5.11: Lecturas del ensayo de control de posición PVM-AC.

Antes de nada, se debe comentar que en este modo de PVM, se realiza una monitorización cada ciertos segundos y no de manera continuada. Es por ello q la figura 5.11 solo muestra el momento posterior a haberse alcanzado los 500 rpm definidos como velocidad objetivo por el operador, y cuando se está realizando el control de velocidad para alcanzar el mismo valor pero con sentido negativo. Por tanto, el grafico donde se monitoriza la evolución de la velocidad 0 a 500 rpm se ha omitido.

El perfil de velocidad monitorizado demuestra que el motor realiza el control de velocidad para pasar de +500 rpm a -500 rpm. Al igual que en el ensayo previo, el motor decelera según el perfil de deceleración seleccionado, que en este caso se establece en 10.000 rpm/s. Tal y como se observa, se realiza un control suave para alcanzar la velocidad objetivo definida en -500 rpm. De nuevo se destaca la forma suave en la pendiente de velocidad, que vuelve a indicar que se está realizando el control con generación de trayectoria.

Los gráficos de posición y corriente vuelven a responden adecuadamente al control de velocidad ejercido. Por un lado, la corriente disminuye suavemente para

conseguir un descenso de velocidad en el motor. Una vez alcanzado el perfil máximo de deceleración, la corriente se mantiene constante. Por último, cuando la velocidad objetivo está próxima a alcanzarse, la corriente aumenta suavemente para conseguir un control de velocidad más preciso.

En cuanto al gráfico de posición, se observa una respuesta adecuada. Cuando la velocidad empieza a decaer, la posición comienza a cambiar su tendencia nuevamente de manera sutil.

Por tanto, y al igual que en el ensayo previo de velocidad, se puede concluir que el control de velocidad en modo PVM-AC responde perfectamente a lo esperado, teniendo un comportamiento acorde con la idea implementada en el *software*.

5.2.2 Monitorización de instrumentos

Para comprobar el correcto funcionamiento y monitorización de todos los instrumentos de medida externos, se realizó un ensayo específicamente para ellos. El operador configura previamente todos los parámetros de los sensores (encoders, acelerómetros y fuerza/par) para que puedan recogerse correctamente las lecturas. A través del HMI de monitoreo de sensores, se pide al sistema que recopile y muestre todos los datos procedentes de los diversos instrumentos; obteniéndose el siguiente resultado mostrado en la figura 5.12.

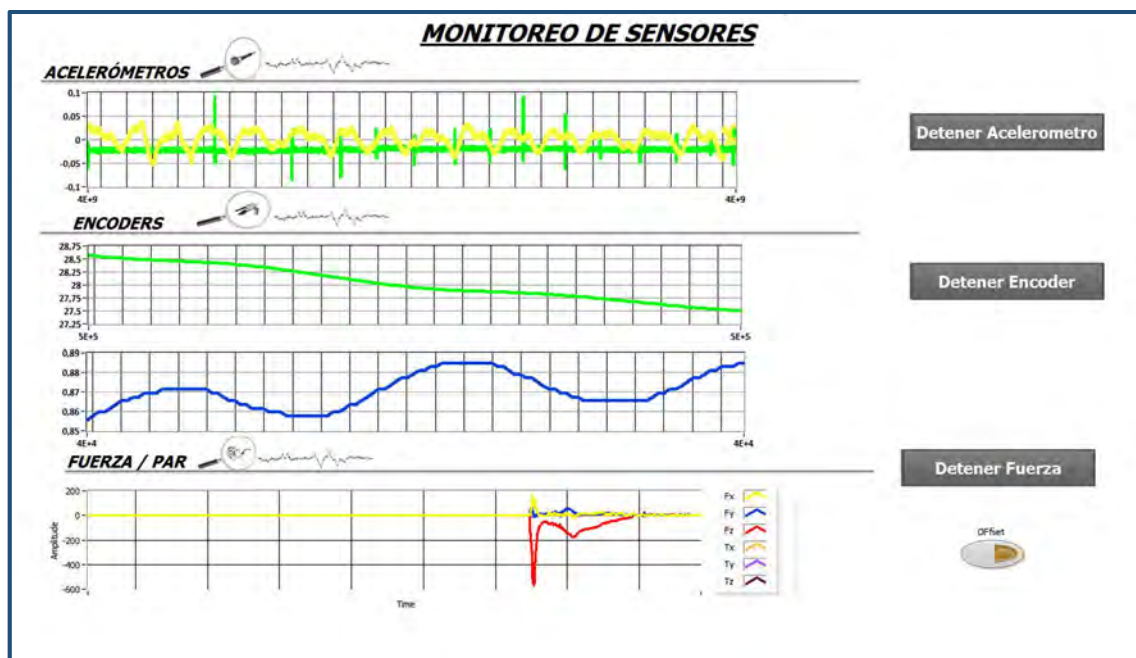


Figura 5.12: Lecturas del ensayo de monitorización de instrumentos.

Como bien se puede notar en la figura previa, todos los instrumentos están realizando correctamente lecturas. En primer lugar, dos acelerómetros recogen pequeñas lecturas cuando se producen variaciones de movimiento en los sensores.

En segundo lugar, los encoders magnéticos recogen y muestran datos de posición relativa de manera satisfactoria.

Y por último, el sensor de fuerza/par registra y muestra las fuerzas y momentos detectados. Notar que el sensor de fuerza integrado en el HMI de monitoreo de sensores es el correspondiente al fabricante ATI.

Si la adquisición se realizará a través del sensor correspondiente al fabricante JR3, se monitorizaría a través de la estación esclava, mostrando unas lecturas similares a las de la figura 5.13.

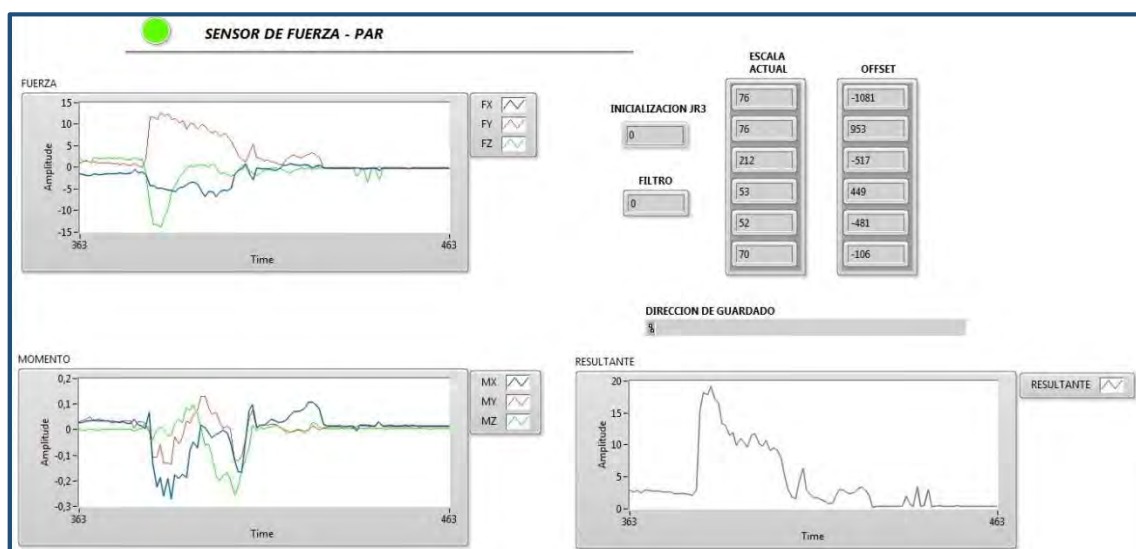


Figura 5.13: Lecturas del ensayo de monitorización en la estación esclava.

Por tanto, de este ensayo dedicado a los sensores externos, puede corroborarse que la integración de la instrumentación, así como la recopilación y monitoreo de datos responde perfectamente a lo esperado, teniendo un comportamiento coherente con los resultados esperados.

5.3 Análisis de colisión del MMJS

5.3.1 Montaje experimental

La figura 5.14 muestra la instalación de MMJS en el banco de ensayos para evaluar su rendimiento. Se puede identificar el actuador junto con un brazo de 1 G.D.L. y el *dummy* para pruebas de choque, que imita la dinámica cabeza-cuello de un ser humano. Durante las pruebas, el eje del motor se coloca perpendicular al suelo con el fin de eliminar el efecto de la gravedad, y el peso añadido al brazo puede variar entre 0 y 3 kg.



Figura 5.14: Montaje experimental del actuador MMJS.

La desviación relativa del brazo con respecto a MMJS será medida mediante el encoder magnético que se observa en la figura previa. El brazo de colisión puede lograr una distancia entre el eje de rotación del motor y el punto de impacto de aproximadamente 70 cm.

El *dummy crash test* tiene una masa de 4,30 kg, montado en un patín que se desliza sobre un carril lineal. Éste está unido a un resorte de compresión, en el cual tiene un índice de rigidez de 4,60 kN/m. La fuerza de colisión del *dummy* puede ser conocida gracias a la adición de un acelerómetro piezoeléctrico y un sensor de fuerza/par en él.

5.3.2 Explotación de la dinámica natural

El primer experimento confirmó la capacidad MMJS para conseguir una reducción del consumo de energía durante movimientos periódicos. Para demostrar esto, una masa de 2,30 kg se acopló a 0,60 m de distancia desde el eje de rotación y posteriormente, todo el actuador fue oscilado siguiendo una señal sinusoidal con amplitud de 0,18 rads. Estos valores garantizan la inclusión de la frecuencia natural del sistema dentro del rango de operación del motor. Luego, la frecuencia de oscilación de 3 Hz se redujo gradualmente hasta 1 Hz.

El experimento fue repetido con diferentes valores de rigidez en los resortes (15,4; 33,3 y 56 kN/m), pero sin precarga ($F_{s0} = 0$). Además, MMJS operó en todo momento

dentro de la primera región elástica. En la figura 5.15, se observa el consumo de energía de MMJS durante un ciclo completo, dependiendo de la frecuencia de oscilación. Allí se puede observar que el uso de la mínima energía se produce cuando la frecuencia de oscilación es más cercana a la frecuencia natural del sistema, el cual depende del valor de rigidez seleccionado para los muelles y la masa acoplada. Esto muestra que la primera zona elástica del MMJS puede ser programada para reducir el consumo de energía y aprovechar el comportamiento elástico del prototipo.

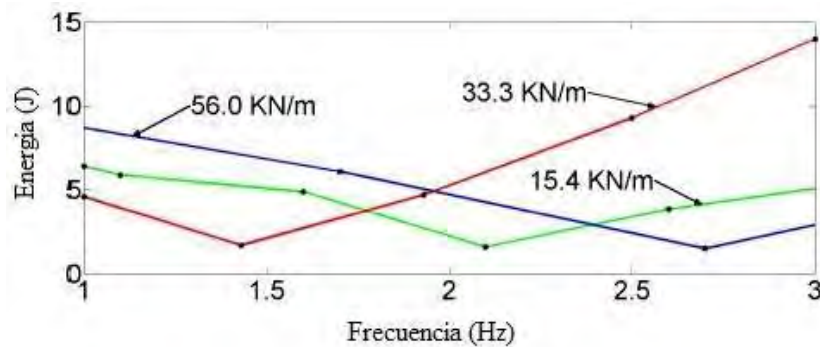


Figura 5.15: El consumo de energía de MMJS para diferentes frecuencias.

5.3.3 Ensayo de seguridad estática

En el segundo experimento, el final del brazo permanece en contacto con la superficie circular del impactador. Partiendo de esta condición inicial, el par motor se aumenta lentamente hasta intensificar la fuerza de contacto entre el brazo y el impactador. Para medir dicha fuerza de contacto, se instaló un sensor en el brazo, justo en el punto de contacto. Como se muestra en la figura 5.16 (a), el brazo sin MMJS produce una fuerza de contacto que aumenta rápidamente por encima de 70 N, debido a la alta rigidez del elemento. Sin embargo, mediante la repetición de la prueba con el MMJS incorporado, la fuerza de contacto se reduce sustancialmente. La rigidez inicial durante el impacto es causado por el muelle principal de precarga, pero una vez que el primer umbral de par (τ_{th1}) se sobrepasa, se produce un cambio en la rigidez como resultado de la compresión de estos mismos muelles. Después de superar el segundo umbral (τ_{th2}), la rigidez se reduce drásticamente, causando una aumento suave de la fuerza de no más de 50 N, cuando se alcanza el par máximo aplicado por el motor.

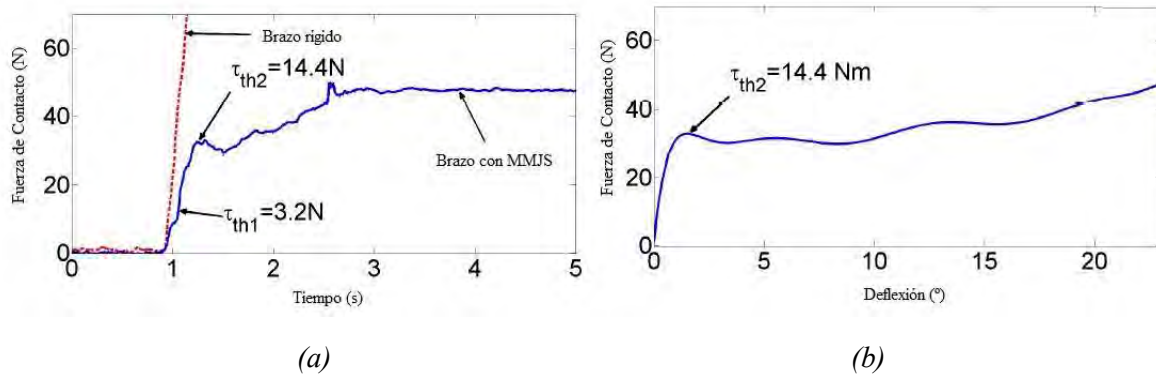


Figura 5.16: Prueba estática: (a) Fuerza de contacto en función del tiempo con y sin el MMJS y (b) Fuerza de contacto frente a deflexión de MMJS.

En la figura 5.17 se puede observar la reacción de MMJS previamente comentada. En 5.17 (a), se muestra la rigidez inicial de MMJS con los muelles de precarga en la zona τ_{th1} . Tras sobrepasar dicha zona, la rigidez pasa al segundo umbral τ_{th2} (5.17 (b)). Y por último, en 5.17 (c) se supera el segundo umbral, observándose una compresión total de los muelles de precarga.

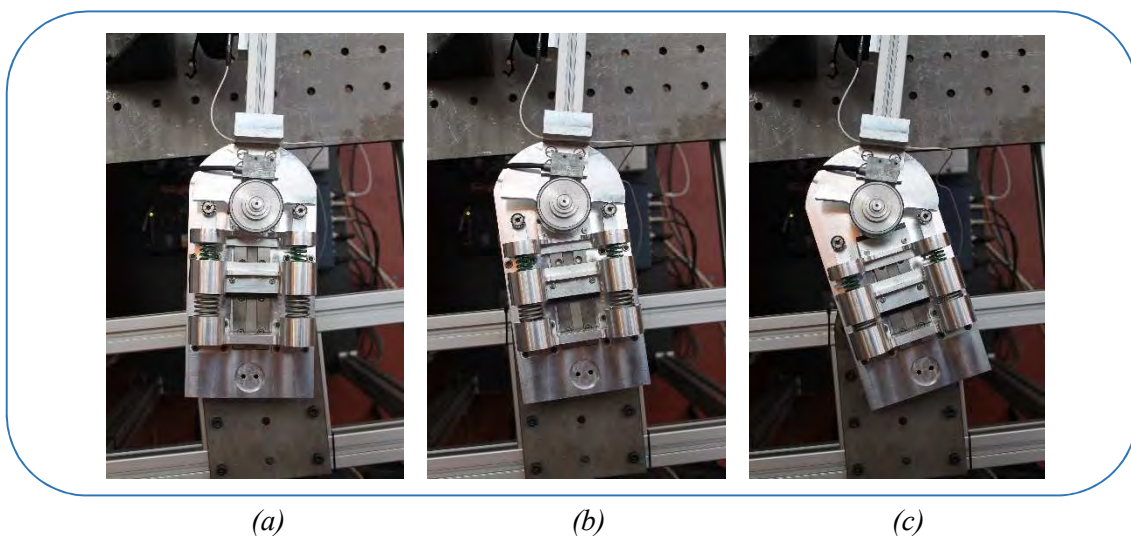


Figura 5.17: Prueba estática en MMJS: (a) Muelles de precarga en zona de par $< \tau_{th1}$, (b) Muelles de precarga en zona $\tau_{th1} < \text{par} < \tau_{th2}$, y (c) Muelles de precarga en zona de par $> \tau_{th2}$.

5.3.4 Ensayo de seguridad para colisiones dinámicas

En este último ensayo, el extremo del brazo colisiona de nuevo contra el impactador montado en el *dummy*. Para ello, se hace girar todo el actuador a una velocidad de 2,70 rad/s, lo que representa una tasa de 1,90 m/s en el punto de contacto. Al igual que en la prueba anterior, una acelerómetro de impactos se colocó en el punto de contacto del brazo. La Figura 5.18 (a) muestra el resultado de la colisión del brazo sin un sistema

flexible y, posteriormente con el MMJS. En ambos casos, el control del actuador se configura para que no exista reacción tras la colisión y el motor seguirá aplicando el par máximo permitido. EL máximo pico de fuerza en el impacto rígido alcanza 340 N y se reduce a 131 N con MMJS. Tras los primeros instantes del impacto, la fuerza de colisión continúa con un suave crecimiento, producto de la flexibilidad de los muelles secundarios, hasta que se alcanza la máxima compresión (188 N).

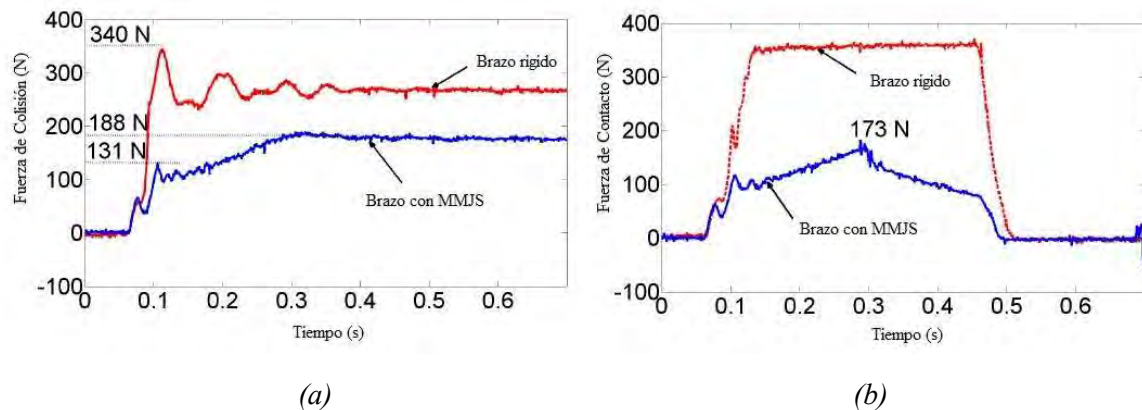


Figura 5.18: Prueba dinámica: (a) con y sin el MMJS, (b) estrategia de reacción.

Aprovechando el tiempo concedido por el MMJS para alcanzar la máxima fuerza, la figura 5.18 (b) muestra el resultado de la evaluación de la fuerza de colisión en las mismas condiciones, pero con una estrategia de reacción tras la colisión. En este caso, el motor comienza a girar en la dirección opuesta tras detectar el impacto. El primer pico del choque continúa, pero la deflexión máxima de MMJS y la gran fuerza de contacto posterior se pueden evitar, ya que con esta estrategia, la máxima fuerza registrada es de tan solo 173 N, aproximadamente la mitad que sin MMJS.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

El objetivo de este trabajo se estableció en la implementación de la automatización de un banco de ensayos para el análisis del efecto de los actuadores de rigidez variable en un impacto entre el brazo robot y una persona. Para ello se propuso el uso del *software* LabVIEW, un lenguaje G de programación que ofrece una alta integración con multitud de dispositivos *hardware* y que ofrece una gran cantidad de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, así como para el desarrollo de instrumentación virtual. Este *software* hizo posible controlar el sistema que compone el brazo robot (motor, reductora, etc.) y los instrumentos específicamente instalados para la recogida de datos (encoders, acelerómetros y fuerza/par) de tal manera que se puede controlar todos los aspectos del sistema desde una única estación, sin tener que añadir electrónica física adicional. Esto permite trabajar de una manera robusta y rápida. Precisamente el mencionado hecho de unificar bajo el mando de una sola estación de control todos los sistemas que integran el banco, posibilita que una sola persona tenga la capacidad de dirigir/controlar la bancada, capturar/monitorizar datos y, modificar/ajustar condiciones de ensayo.

A partir de los resultados de las pruebas realizadas, se puede concluir que el sistema de control, captura y monitorización datos, responde perfectamente a los parámetros definidos por el operador para cada ensayo. Los *test* de verificación de control de la bancada demostraron que el sistema es capaz de controlar el actuador en posición, velocidad y corriente, siguiendo diferentes perfiles, ya sean generados por el propio banco o establecidos por el operador. En todos los casos se respetaron los parámetros de control definidos, sin generar errores o pérdidas de control que pudieran desembocar en peligro a la hora de ejecutar los ensayos.

La monitorización y captura de los datos procedentes de la diversa instrumentación muestran un comportamiento adecuado. En ningún caso se producen pérdidas de información por falta de comunicación entre la estación y los sensores. La robustez del *software* desarrollado permitió al operador realizar cambios en el número de sensores a monitorizar, añadiendo o disminuyendo su número sin presentarse fallos.

En los ensayos de impacto llevados a cabo con el actuador de rigidez variable MMJS, se demostró que ofrece un mayor nivel de seguridad para el contacto humano-robot, disminuyendo significativamente la fuerza del impacto. Este dispositivo confirmó que dispone de hasta tres áreas de funcionamiento que pueden ser diseñadas para el beneficio en diferentes acciones del mismo actuador. Después de las pruebas, se pueden presentar las siguientes conclusiones:

- Una primera zona de operación de alta rigidez se mantiene siempre que existan pares externos más pequeños que el primer par umbral. Esto facilita la precisión



en el posicionamiento, y su valor puede ser configurado a través de los muelles principales de precarga.

- Existe una segunda área de operación de rigidez media, donde el sistema flexible reduce el consumo de energía en movimientos cíclicos, siendo ésta una ventaja exportable en ciertos ámbitos.
- La rigidez puede cambiar rápidamente de un valor medio a un valor de baja rigidez al superarse el segundo umbral de par. Esto se traduce en una reducción del máximo pico de fuerza en choque y un acrecentamiento del tiempo de reacción antes de una posible colisión con consecuencias mayores.

Con este trabajo de fin de grado se ha pretendido contribuir al desarrollo de los actuadores flexibles de rigidez variable en entornos reales, para seguir estudiando el comportamiento de dichos dispositivos, que actualmente siguen en desarrollo.

Debido a la propia naturaleza experimental que se hace evidente en el diseño de los propios mecanismos, es de esperar nuevos avances en este ámbito aplicado a la robótica.

6.2 Posibles mejoras

El *software* de control para el banco está diseñado para optimizar al máximo el rendimiento en el PC, pero las limitaciones *hardware* son inevitables tanto en la adquisición de datos como en la frecuencia de refresco de los bucles de control. Contar con un sistema específico diseñado para el control en tiempo real como el *NI Module LabVIEW Real-Time* o *CompactRIO* que cuentan con un alto rendimiento, sería ideal para aplicaciones que requieren habilidades de procesamiento multinúcleo intenso, gráficos integrados o periféricos de procesador; como ese el caso de este trabajo. Esto tendría un impacto evidente, pudiendo integrar el sensor JR3 en el la estación maestra (prescindiendo de la esclava), obteniendo una monitorización de datos mucho más dinámica, y un control más rápido y preciso.

Los prototipos utilizados en este trabajo están orientados a tareas de experimentación, por lo que han sido sobredimensionados intencionadamente desde la idea de diseño, para asegurar su integridad mecánica ante los ensayos. Por tanto, una de las principales mejoras estaría orientada a la optimización de las dimensiones y peso de AVASTT y MMJS, ya que la inercia y velocidad del robot son parámetros de gran influencia en la dinámica del impacto y en el daño causado sobre el *dummy* y sobre los propios actuadores, por lo que siempre será positivo y deseable reducir la masa e inercia; donde dicha reducción iría asociada probablemente a un aumento favorable de la flexibilidad de los eslabones y articulaciones.

6.3 Líneas de actuación en el futuro

Este trabajo permite obtener nuevos conocimientos acerca de dispositivos actuadores que tienen como objetivo garantizar la seguridad física cuando existe interacción hombre-robot. A nivel experimental, nuevos escenarios imaginables podrían centrarse en la sustitución del modelo cabeza-cuello por otros modelos asociados a diferentes partes del cuerpo que permitieran analizar entornos de contacto más complejos y diferentes. También se podría plantear la incorporación de estos prototipos a un brazo robot, con el objetivo de analizar y seguir desarrollando sistemas de control que permitan explotar las funcionalidades de estos mecanismos en distintas aplicaciones. Por último, sería deseable seguir trabajando con el banco de ensayos para realizar la identificación del sistema del prototipo AVASST, así como analizar y documentar su respuesta ante impactos.

A nivel teórico, se plantea como interesante la realización de nuevas propuestas de dispositivos que regulen el acoplamiento flexible, pudiendo obtener así resultados más favorables en la reducción de daño; así como estudios para la optimización del diseño de actuadores flexibles en referencia a los materiales utilizados, mejorando el rozamiento entre los diferentes elementos, pesos, resistencias, etc.

Fuera del campo de la protección hombre-máquina, AVASTT y MMJS pueden ser empleados en un considerable número de aplicaciones en las que, gracias a su capacidad de almacenar y devolver energía, estos tipos de actuadores están aportando grandes ventajas frente a los actuadores rígidos convencionales. Probablemente los mecanismos de robots caminantes, serían el objetivo más interesante a analizar, siendo necesarios nuevos trabajos de investigación que aborden este tema.



7 PRESUPUESTO

A continuación se presenta un presupuesto aproximado del coste de toda la electrónica necesaria para el desarrollo de este estudio (Tabla XXIX).

Tabla XXIX: Presupuesto.

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio
1	Controlador para motores Maxon EPOS2 (principal). Versión 70/10	1	571,54 €/u.
2	Controlador para motores Maxon EPOS2 (secundario). Versión 50/5	1	545,18 €/u.
3	Sistema de adquisición de datos NI-DAQ. Modelo NI-DAQPAD 6251	1	2360,00 €/u.
4	Motor Maxon con escobillas de grafito (principal) Modelo 370354 RE-50 200 W	1	428,00 €/u.
5	Motor Maxon con escobillas de grafito (secundario). Modelo 310007 RE-30 60 W	1	253,27 €/u.
6	Encoder 3 canales con Line Driver, para ambos motores. Modelo MR 500 ppv	2	90,91 €/u.
7	Reductor planetario Maxon para motor principal. Modelo 110505 62 A 50 Nm	1	503,09 €/u.
8	Reductor planetario Maxon para motor secundario. Modelo 166161 32 A 4,5 Nm	1	137,55 €/u.
9	Sensor de fuerza/par JR3 inc. Modelo 85M35A3	1	956,68 €/u.
10	Tarjeta acondicionadora de señal PCI JR3 inc. Modelo 3114 6 ch	1	326,00 €/u.
11	Acelerómetro lineal PCB Piezotronics. Modelo 200B04	1	111,20 €/u.
12	Acelerómetro lineal PCB Piezotronics. Modelo J352C03	1	100,62 €/u.
13	Acelerómetro triaxial PCB Piezotronics. Modelo 356A15	1	250,25 €/u.
14	Acondicionador de señales PCB Piezotronics. Modelo 482C05	1	340,00 €/u.
15	Encoder magnético ASM. Modelo POSIROT PMIS4	2	123,02 €/u.
16	Software NI-LabVIEW. Versión profesional 2014	1	1443,75 €/lic.
PRESUPUESTO TOTAL			8754,99 €

8 BIBLIOGRAFÍA Y APÉNDICES

8.1 Bibliografía

A. Pratt, G. & M. Williamson, M., 1995. Series Elastic actuators. *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 399-406.

Ahmed, M. R., 2011. Compliance control of robot manipulator for safe physical human robot interaction. *Örebro University, School of Science and Technology*.

Albu-Schäffer, A., Ott, C., Frese, U. & Hirzinger, G., 2003. *Cartesian impedance control of redundant robots: Recent results with the dlr-light-weight-arms*. In *IEEE international conference of robotics and automation*, pp. 3704-3709.

Bharadwaj, K., Sugar, T. G., Koeneman, J. B. & Koeneman, E. J., 2005. Design of a robotic gait trainer using spring over muscle actuators for ankle stroke rehabilitation. *Journal of Biomechanical Engineering*, 127(6), pp. 1009-1013.

Bicchi, A. & Tonietti, G., 2004. Fast and soft arm tactics: Dealing with the safety-performance trade-off in robot arms design and control. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 11(2), pp. 22-23.

Bonilla Guitérrez, I., 2015. *Saberes y Ciencias*. [En línea]
Available at: <http://saberesyciencias.com.mx/2015/04/06/la-interaccion-humano-robot/>

Bosio, A. C. & Bowman, B. M., 1985. *Analysis of head and neck dynamic response of human and*, Transportation Research Institute University of Michigan Technical Report, Ann Arbor, Michigan.

Carrasco Escánez, A., 2012. *Análisis y diseño de un acoplamiento flexible para seguridad en la interacción hombre-robot*. Proyecto fin de carrera ed. Almería: Universidad de Almería.

Choi, J., Hong, S., Lee, W. & Kang, S., 2009. A variable stiffness joint using leaf springs for robot manipulators. *Icra*, pp. 4363-4368.

Chou, C. P. & Hannaford, B., 1996. Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles. Volumen 12.

De Luca, A., 2008. Robots with flexible elements. En: *Springer handbook of robotics*. s.l.:Siciliano, Khatib, pp. 288-289.

Deng, R., Davies, P. & Bajaj, A. K., 2003. Flexible polyurethane foam modelling and identification of viscoelastic parameters for automotive seating applications. *Journal of Sound and vibration*, 262(3), pp. 391-417.

Echávarri Otero, J., Carbone, G., Ceccarelli, M. & Muñoz Sanz, J. L., 2007. *Criterios para la seguridad en el uso de los robots*. Cusco.

English, C. & Russell, D., 1999. Mechanics and stiffness limitations of a variable stiffness actuator for use in prosthetic limbs. En: *Mechanism and Machine Theory*. pp. 7-25.



- Fernández Pastor, M., 2012. *Diseño y simulación de un mecanismo de rigidez variable para articulaciones de revolución de robots*. Proyecto fin de carrera ed. Almería: Univesidad de Almería.
- Ghorbani, R. & Wu, Q., 2006. *Closed loop control of an intentionally adjustable compliant actuator*. American control conference.
- Giménez Fernández, A. y otros, 2012. Diseño y simulación de un actuador de rigidez variable.
- Gong, S. W., Lee, H. P. & Lu, C., 2008. Dynamic response of a human head to a foreign object impact. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(3), pp. 1227-1229.
- Haddadin, S., Albu-schäffer, A. & Hirzinger, G., 2007. *Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing*. Science and Systems Conference (RSS2007), Atlanta, USA, pp. 217-224.
- Haddadin, S., Albu-Schäffer, A. & Hirzinger, G., 2008. *The role of the robot mass and velocity in physical human-robot interaction - part I: Non-constrained blunt impacts*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, USA, pp. 1331-1338.
- Ham, R. y otros, 2007. Macepa, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: A 3dof joint with two independent compliances. *International Applied Mechanics*, 43(4), pp. 467-474.
- Hollander, K., Sugar, T. & Herring, D., 2005. Adjustable robotic tendon using a 'jack spring' trade. *Rehabilitation robotics, 2005. icorr 2005. 9th international conference on*, pp. 113-118.
- Hurst, J., Chestnutt, J. & Rizzi, A., 2004. An actuator with mechanically adjustable series compliance. (*Inf. Téc. n.o CMU-RI-TR-04-24*).
- Hutter, M., 2013. *StarLETH & Co. – Design and Control of Legged Robots with Compliant Actuation*. Master of Science in Mechanical Engineering ed. Oberriet-Kriessem : ETH Zurich.
- Hyun, D., Yang, H. S., Park, J. & Shim, Y., 2010. Variable stiffness mechanism for human-friendly robots. En: *Mechanism and Machine Theory*. pp. 880-897.
- Jafari, A., Tsagarakis, N., Vanderborght, B. & Caldwell, D., 2010. *A novel actuator with adjustable stiffness (awas)*. Intelligent robots and systems (iros), 2010 iee/rsj international conference on, pp. 4201-4206.
- Kawamura, S. y otros, 2002. Development of passive elements with variable mechanical impedance for wearable robots. *Icra*, pp. 248-253.
- Kelly, R., Ortega, R., Ailon, A. & Loria, A., 1994. Global regulation of flexible joint robots using approximate differentiation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(6), pp. 1222-1224.
- Kikuchi, T. K., Ikeda, K. & Furusho, J., 2009.
- Kim, B. S. & Song, J. B., 2010. *Hybrid dual actuator unit: A design of a variable stiffness actuator based on an adjustable moment arm mechanism*. Robotics and automation (icra), 2010 iee international conference on, pp. 1655-1660.
- Koganezawa, K., Inaba, T. & Nakazawa, T., 2006. Stiffness and angle control of antagonistically driven joint. *The First IEEE/RASEMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics 2006 BioRob 2006*, pp. 1007-1013.

- Konno, A. & Uchiyama, M., 1995. Vibration suppression control of spatial flexible manipulators.. *Control Engineering Practice*, 3(9), pp. 1315-1321.
- López Martínez, J., 2014. *Modelado dinámico del impacto hombre-robot. Aplicación al diseño de actuadores de rigidez variable para robots de servicio*. Tesis doctoral ed. Almería: Universidad de Almería.
- López Martínez, J. y otros, 2014. *Acoplamiento flexible de seguridad para la interacción*. Málaga.
- Lozano Ferre, F. J., 2012. *Modelado y simulación de actuadores de rigidez variable en situaciones de impacto hombre-robot*. Proyecto fin de carrera ed. Almería: Universidad de Almería.
- Lozano Vallés, P. F., Medina, J., Jardón, A. & Balaguer, C., 2015. Mechanism of multiple joint stiffness for the better performance and the safety physical interaction human robot. *Inédito*.
- Luca, A. D. & Lucibello, P., 1993. Trajectory tracking of flexible joint robots: A passivity approach. *Euro. control conf.*.
- Luca, A. D. & Lucibello, P., 1998. A general algorithm for dynamic feedback linearization of robots with elastic joints. *Icra '98*, pp. 504-510.
- Mao, Y. y otros, 2007. *A reinforcement learning based dynamic walking control*. Robotics and automation 2007 ieee international conference on, pp. 3609-3614.
- Medina Hernández, J., 2001. *Control de manipuladores con rigidez articular variable atendiendo a criterios de seguridad*. Leganés: Tesis Máster Robótica y Automatización.
- Melvin, J. W., Robbins, D. H., Weber, K. & Campbell, K. L., 1985. Review of dummy design and use. *The University of Michigan Transport Research Institute*.
- Migliore, S. A., Brown, E. A. & DeWeerth, S. P., 2005. Biologically inspired joint stiffness control. En: *Icra*. pp. 4508-4513.
- Morita, T. & Sugano, S., 1995. Design and development of a new robot joint using a mechanical impedance adjuster. *Icra*, pp. 2469-2475.
- Morita, T. & Sugano, S., 1997. Development of an anthropomorphic forcecontrolled manipulator wam-10. *Advanced robotics, 1997. icar '97. proceedings. 8th international conference on*, pp. 701-706.
- Okada, M., Nakamura, Y. & Hoshino, S., 1999. Development of the cybernetic shoulder-a three dof mechanism that imitates biological shoulder-motion. *Intelligent robots and systems, 1999. iros '99. proceedings. 1999 ieee/rsj international conference on*, Volumen 1, pp. 543-541.
- Pires, N., 2005. *Librería LabVIEW JR3 sensor force/torque*, Coimbra: http://robota.dem.uc.pt/jr3pci_v2005.
- RAE, 2015. *Diccionario de la lengua española*. s.l.:Real Academia Española.
- Sánchez Salinas, S., 2012. *Diseño y análisis de un actuador de rigidez variable para robots de servicio*. Almería: Proyecto fin de carrera Ing. Técnica Industrial, Mecánica.
- Shin, D. y otros, 2010. Design and control of a bio-inspired human-friendly robot. *I. J. Robotic Res*, 29(5), pp. 571-584.



- Spong, M., 1987. In other words. En: *Robots with elastic joints : Modeling and control*. pp. 310-319.
- Sulzer, J. S., Peshkin, M. A. & Patton, J. L., 2005. *Mamonet: An exotendondriven rotary series elastic actuator for exerting joint torque*. 2005 IEEE 9th international conference on rehabilitation robotics icorr 2005 June 28 2005 July 1, pp. 103-108.
- Thorson, I. y otros, 2007. Design considerations for a variable stiffness actuator in a robot that walks and runs.
- Tonietti, G., Schiavi, R. & Bicchi, A., 2005. *Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction*. International conference on robotics and automation, pp. 526-531.
- Tsagarakis, N. G., Laffranchi, M., Vanderborght, B. & Caldwell, D. G., 2009. *A compact soft actuator unit for small scale human friendly robots*. Piscataway, NJ, USA, pp. 1998-2004.
- V. Ham, R. y otros, 2009. Compliant actuator designs: Review of actuators with passive adjustable. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Volumen 16, pp. 81-94.
- V. Ham, R. y otros, 2009. Compliant actuator designs: Review of actuators with passive adjustable compliance/controllable stiffness for robotic applications. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Volumen 16, pp. 81-94.
- Van Damme, M. y otros, 2010. The safety of a robot actuated by pneumatic muscles: A case study. *International Journal of Social Robotics*, Volumen 2, pp. 289-303.
- Verrelst, B. y otros, 2005. The pneumatic biped Lucy actuated with pleated pneumatic artificial. *Autonomous Robots*, Volumen 18, pp. 201-213.
- Williamson, M. M., Pratt, G. A. & Morgenthaler, F. R., 1995. *Series elastic actuators*.
- Wismans, J. & Spenny, D. H., 1984. *Head-neck response in frontal flexion*. 28th Stapp Car Crash Conference, pp. 161-171.
- Wolf, S. & Hirzinger, G., 2008. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1741-1746.
- Zinn, M., Khatib, O., Roth, B. & Salisbury, J. K., 2002a. *A new actuation approach for human friendly robot design*. International symposium on experimental robotics, pp. 379-398.

8.2 Apéndice 1 - LabVIEW

8.2.1 Software

LabVIEW es un entorno de programación gráfico de propósito general, usado por multitud de ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos a través de una apariencia de control del flujo de datos.

Entre sus principales ventajas, ofrece una robusta capacidad de integración con una gran cantidad de dispositivos de *hardware*, brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, provee de una variada gama de características y herramientas de asistencia al desarrollador así como multitud de interfaces de usuario configurables.

La base de esta programación intuitiva se basa en el concepto de aprendizaje observado y procesado de imágenes sin necesidad de pensamiento consciente, lo que implica una reducción significativa en el tiempo de plasmación de las ideas del desarrollador en el lenguaje de programación, a diferencia de los lenguajes de programación tradicionales que requieren el empleo de cantidades ingentes de tiempo en aprender la sintaxis necesaria asociada con el lenguaje ordinario y mapear la estructura del mismo en el problema a solventar.

Gracias a ello, la plataforma LabVIEW se ha hecho líder en la industria desde su introducción en 1986.

8.2.2 LabVIEW: Programación gráfica de flujo de datos

LabVIEW es diferente de la mayoría de lenguajes de propósito general principalmente en dos vertientes. Primero, la programación se desarrolla cableando íconos gráficos en un diagrama que compila directamente a código máquina.

Aunque se representa gráficamente en lugar de texto, contiene los mismos conceptos de programación que se pueden encontrar en la mayoría de los lenguajes tradicionales. Por ejemplo, incluye todas las construcciones estándar tales como tipos de datos, bucles, eventos, variables, recursividad y programación orientada a objetos (Figura 8.1).

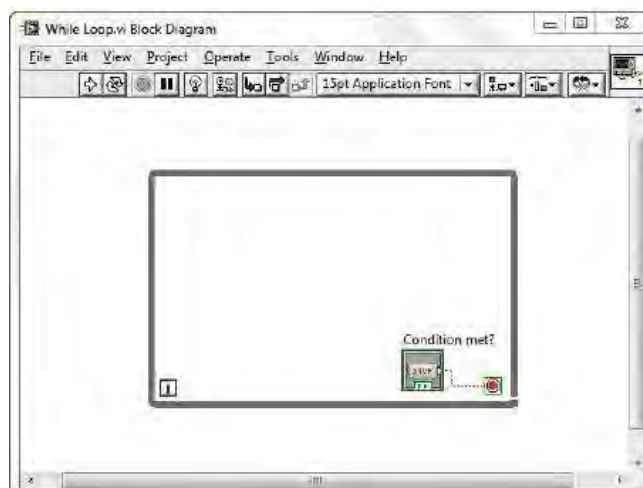


Figura 8.1: Un bucle While se representa por un lazo gráfico que se ejecuta hasta que se cumple una condición de parada.

La segunda diferencia principal se basa en que los nodos en un programa de LabVIEW (palabras, funciones y estructuras como bucles y subrutinas) tienen entradas, procesan datos y generan salidas. Una vez que todas las entradas de los nodos contienen un dato válido, dicho nodo ejecuta su lógica, produce datos de salida y transmite los datos al siguiente nodo en la secuencia del flujo. Un nodo que recibe datos de otro, puede ejecutarse si y solo si, el primero ha completado su ejecución.

8.2.3 Herramientas de depuración interactiva

Puesto que el código visual de LabVIEW es sencillo de comprender, las tareas más comunes de programación como el depurado, se vuelven también más intuitivas. Así pues, LabVIEW provee de herramientas de depuración únicas que se puede usar para observar el movimiento interactivo de los datos a través del código en el programa así como los valores con los que interactúan las diferentes funciones (ejecución *highlighting*) (Figura 8.2).

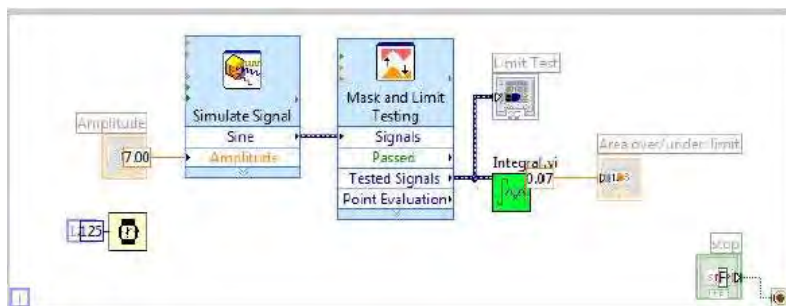


Figura 8.2: La ejecución Highlight provee de una forma intuitiva de entender el orden de ejecución del código.

LabVIEW también ofrece herramientas de depuración comparables con aquellas que se encuentran en los lenguajes tradicionales. Estas herramientas incluyen sondas, puntos de parada y ejecución paso a paso (Figura 8.3).



Figura 8.3: La barra de herramientas ofrece acceso a las herramientas de depuración estándar como la ejecución paso a paso.

Las herramientas de depuración, permiten sondear los datos en diferentes partes del programa simultáneamente, pausar la ejecución, y ejecutar paso a paso una subrutina sin programación compleja (Figura 8.4). Aunque esto es posible en otros lenguajes de programación más convencionales, este entorno visual da la posibilidad de observar de manera sencilla el estado del programa y la relación entre las partes paralelas del código.

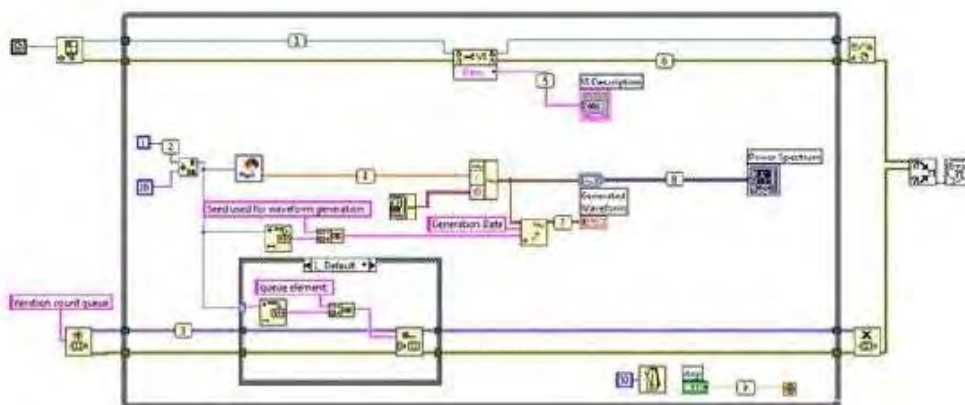


Figura 8.4: Las sondas son formas eficientes de ver los valores moviéndose por los cables de la aplicación, incluso para secciones paralelas del código.

Se debe destacar una de las herramientas más útiles de depuración, que se encuentra en el propio compilador. Simultáneamente que se desarrolla el programa, el compilador busca errores y provee de información semántica y sintáctica de la aplicación. Si se detecta un error, no se permitirá la ejecución del programa, y se visualizará el pulsador de ejecución roto en la barra de herramientas (Figura 8.5).



Figura 8.5: La flecha rota de ejecución provee de información inmediata de errores en el código.

Presionando dicho pulsador de ejecución, el compilador mostrará una lista de los posibles problemas a solventar por el desarrollador (Figura 8.6).

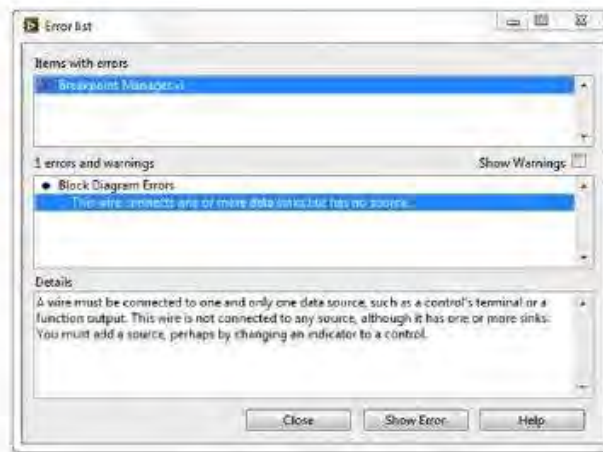


Figura 8.6: Lista de errores detectados en el código, así como posibles causas y soluciones.

8.2.4 Paralelismo en el software

Los lenguajes de flujo de datos como LabVIEW permiten “paralelizar” automáticamente. A diferencia de los lenguajes secuenciales como C y C++, los programas gráficos contienen de forma inherente información sobre qué partes del código pueden ser ejecutadas paralelamente. Como ejemplo, un patrón común de diseño es el Productor/Consumidor, en el que dos bucles *while* se ejecutan independientemente: el primero es el responsable de la producción de datos y el segundo del procesamiento. En la ejecución en paralelo los datos interactúan entre los bucles usando procesos de colas, las cuales, son estructuras de datos estándar en los lenguajes de programación de propósito general.

El paralelismo es importante en la programación ya que desbloquea las ganancias de rendimiento relativas a los programas secuenciales debido a cambios recientes en el diseño de los procesadores. Como resultado, los fabricantes han diseñado nuevas arquitecturas con múltiples núcleos de procesamiento (Figura 8.7).

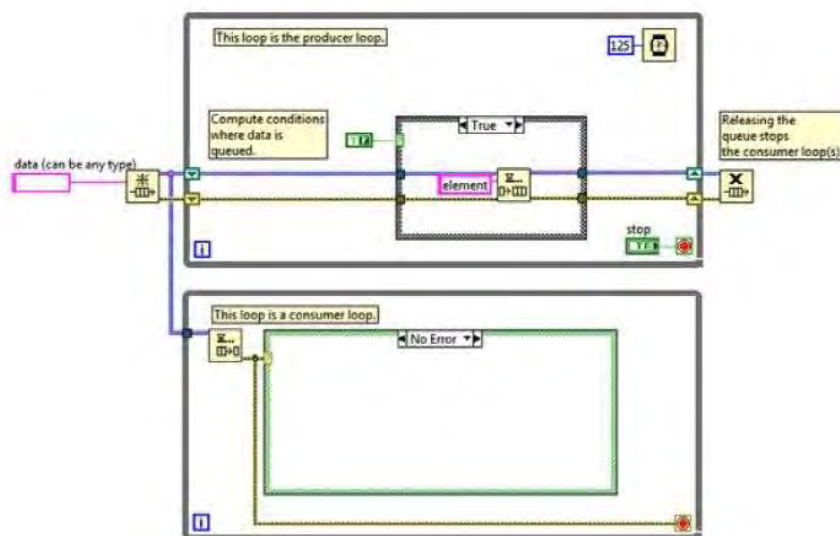


Figura 8.7: El patrón de diseño Productor/Consumidor de LabVIEW es a menudo usado para aumentar el rendimiento de las aplicaciones que requieren tareas paralelas.

Para sacar provecho al rendimiento disponible en procesadores multinúcleo, se ha de usar el multihilo en sus aplicaciones. Si se emplea los tradicionales lenguajes basados en texto, debe crear y administrar hilos para implementar el paralelismo, un desafío de envergadura para programadores no expertos.

Por el contrario, la naturaleza paralela de LabVIEW a la multitarea y multihilo fáciles de implementar. El compilador trabaja continuamente para identificar secciones paralelas del código.

8.2.5 Una manera mejor de solucionar problemas

LabVIEW y su lenguaje de programación gráfico de flujo de datos provee una solución a la hora de afrontar los problemas que las alternativas tradicionales de bajo nivel. Las claves diferenciadoras de esta programación son el código gráfico intuitivo que se crea y las reglas de movimiento de los datos que gobiernan la ejecución que se combinan para ofrecer una experiencia de programación que expresa el pensamiento de los procesos de sus usuarios de forma más cercana que otros lenguajes. A pesar de que este es un lenguaje de alto nivel, se puede lograr rendimientos comparables a los de los lenguajes como C gracias al compilador de LabVIEW (Figuras 8.8 y 8.9).

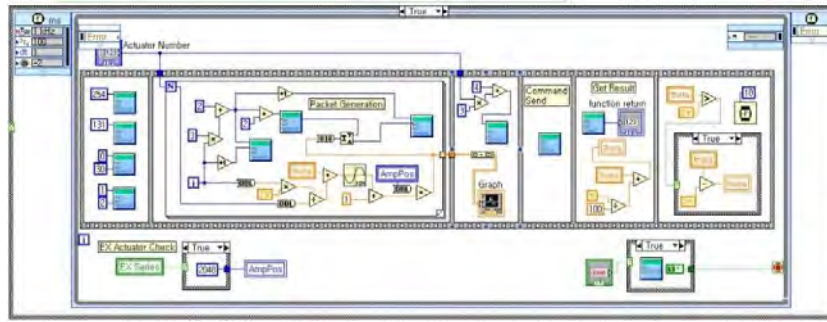


Figura 8.8: Solución mediante código en LabVIEW.

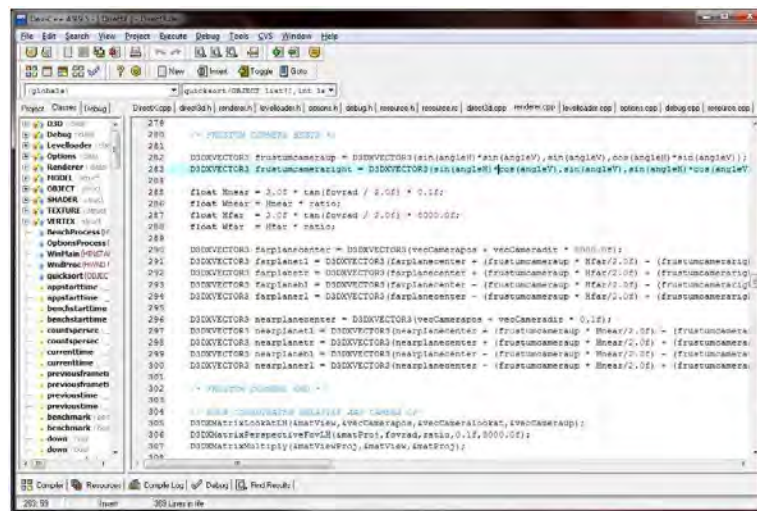


Figura 8.9: Solución mediante código en C++.

8.3 Apéndice 2 - Instalación sensor JR3, inc.

8.3.1 Instalación del sensor fuerza/par y tarjeta procesadora de señal JR3, inc.

Debido a la escasa información disponible para el uso del sensor JR3 bajo sistema operativo Windows, a continuación se realiza una descripción de los pasos a seguir para su instalación, verificación y comprobación, antes de utilizar el *software* desarrollado en LabVIEW.

8.3.1.1 Instalación de tarjeta procesadora de señal (PCI) JR3, inc.

- i. Descargar los *drivers* para la tarjeta basados en *WinDriver*. Sólo para versiones de 32-bit:

http://www.jr3.com/uploads/4/5/7/0/45700429/_jr3_pci.zip

- ii. Una vez descargados, descomprimirlos e instalar la aplicación denominada *wdreg.exe*.
- iii. Instalar la aplicación denominada *windrvr.exe*.
- iv. Comprobar a través del administrador de dispositivos del PC, que se observa y detecta lo siguiente (Figura 8.10):

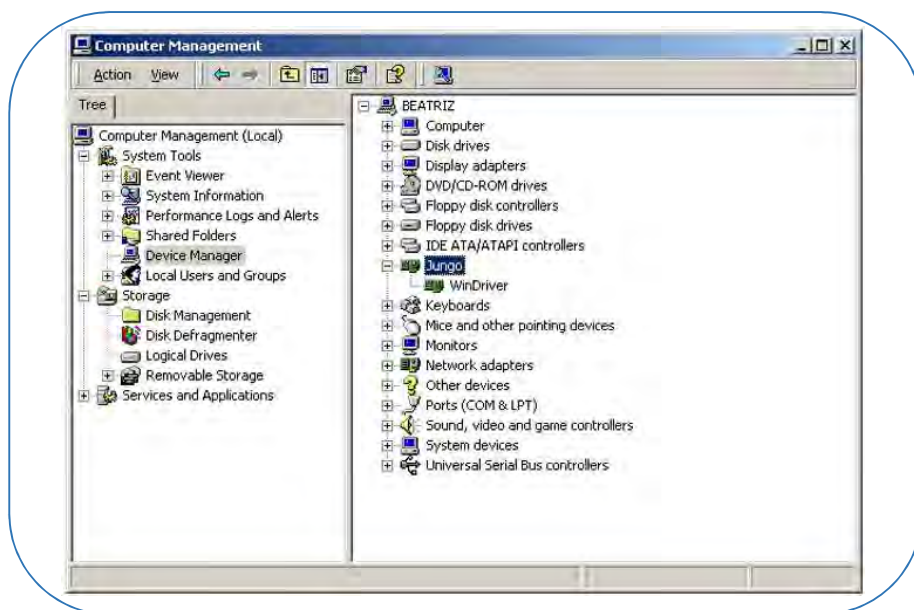


Figura 8.10: Ejemplo de software para reconocimiento de tarjeta PCI.

- v. Apagar el PC, insertar la tarjeta PCI en el *slot* correspondiente, y encender de nuevo.
- vi. Comprobar de nuevo a través del administrador de dispositivos del PC, que se observa y detecta lo siguiente (Figura 8.11):

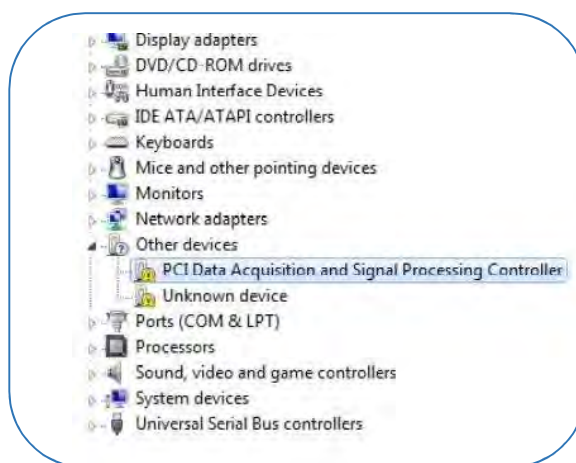


Figura 8.11: Ejemplo de reconocimiento desconocido de tarjeta PCI.

- vii. Pulsar con el botón derecho del ratón en *PCI Data Acquisition and Signal Processing Controller*, y elegir “Actualizar software de controlador”, “Buscar software de controlador en el equipo”.
- viii. Especificar la ruta de la carpeta de *drivers* JR3 previamente descargada (Figura 8.12).



Figura 8.12: Ejemplo de selección de ruta para instalación de tarjeta PCI.

- ix. Comprobar que se ha instalado correctamente la tarjeta PCI (Figura 8.13).

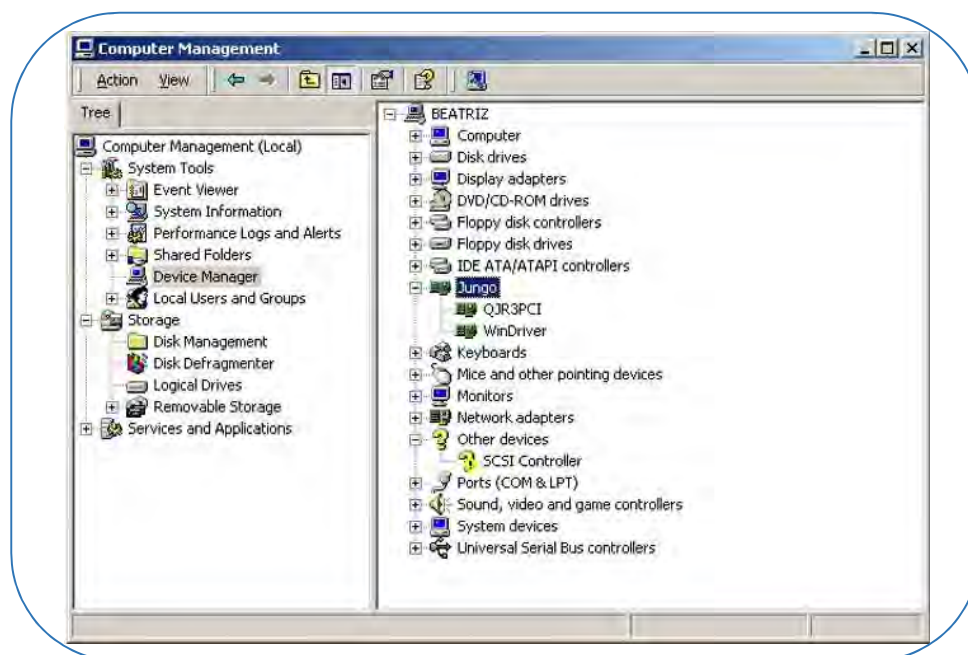
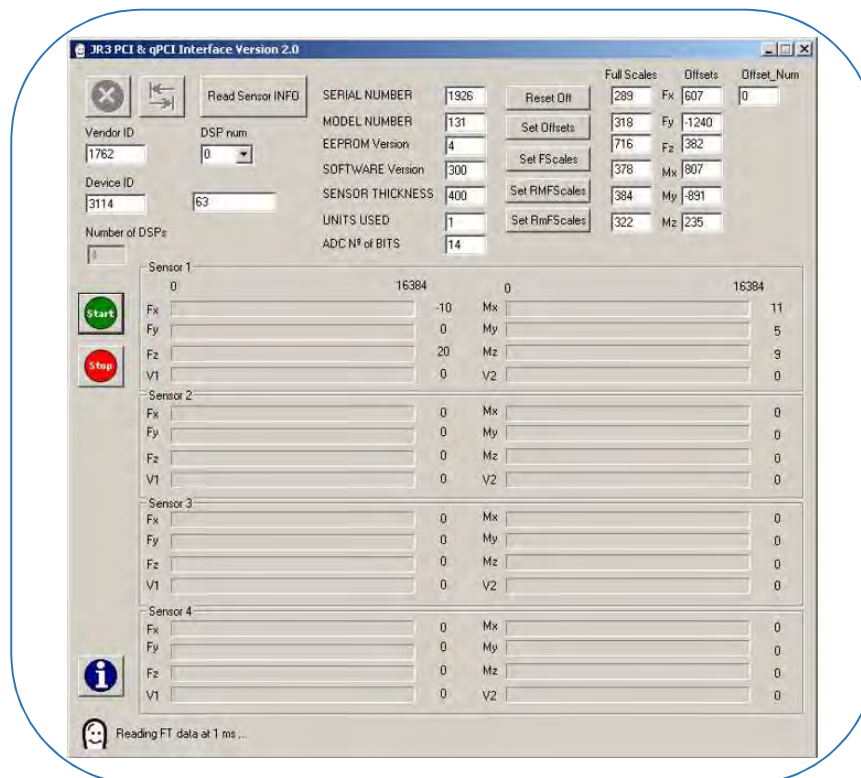


Figura 8.13: Ejemplo de instalación completada de tarjeta PCI.

- x. Conectar el sensor fuerza/par a la tarjeta PCI, e iniciar el *software*-interfaz para comprobar su correcto funcionamiento (Figura 8.14).



Nota: Referirse al capítulo 4.9 Protocolo de puesta en marcha, para la correcta configuración del sensor.

***Figura 8.14:** Ejemplo de instalación de software-interfaz para comprobación de tarjeta PCI.*

8.3.1.2 Instalación de driver ActiveX y librería para el sensor JR3, inc. en LabVIEW

- i. Descargar la librería específicamente diseñada para este sensor en LabVIEW, denominada “jr3pci_soft_2005”:
http://robota.dem.uc.pt/jr3pci_v2005
- ii. Registrar el controlador *ActiveX*. Para ello, ejecutar la aplicación “Símbolo del sistema” del PC como administrador, e ir al directorio que contiene la carpeta “activex” dentro de “jr3pci_soft_2005”, previamente descargada (Figuras 8.15 y 8.16).

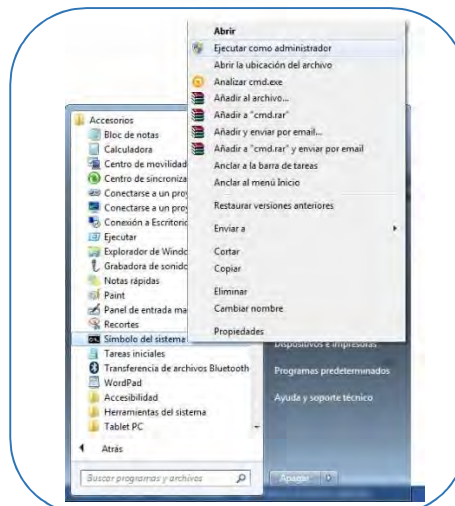


Figura 8.15: Ejemplo de ejecución de la aplicación “Símbolo del sistema”.

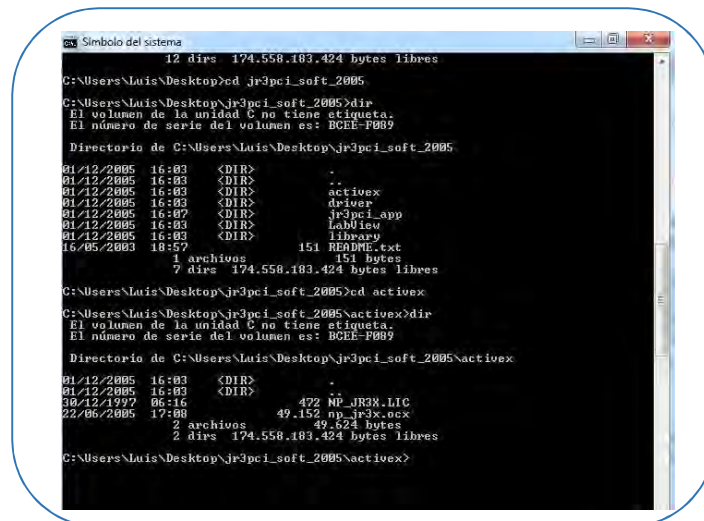


Figura 8.16: Ejemplo de ubicación de la carpeta jr3pci_soft_2005 mediante “Símbolo del sistema”.

- iii. Escribir lo siguiente, para registrar el controlador (Figura 8.17):
`regsvr32 np_jr3x.ocx`.

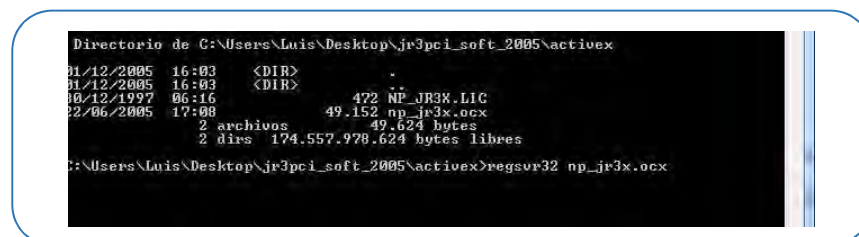


Figura 8.17: Ejemplo de registro del controlador ActiveX desde la aplicación “Símbolo del sistema”.

- iv. LabVIEW ahora es capaz reconocer la librería diseñada específicamente para el sensor.

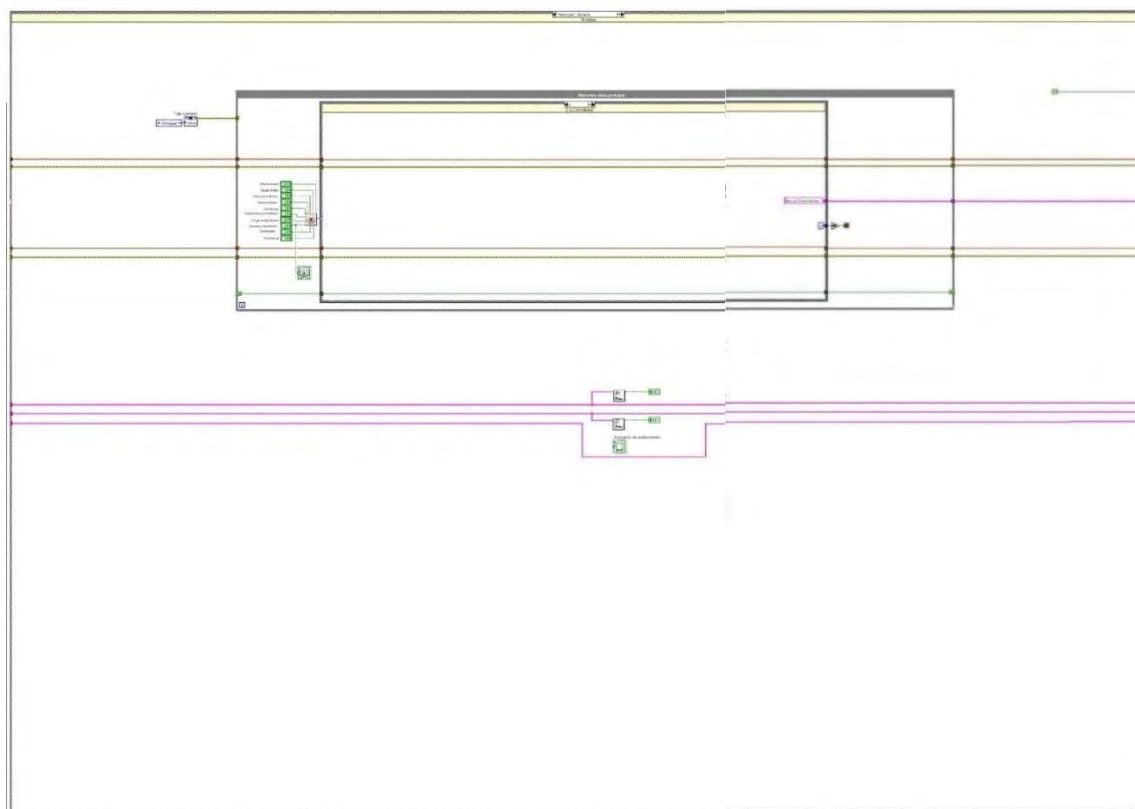
8.4 Apéndice 3 - Planos Software

Índice de Planos

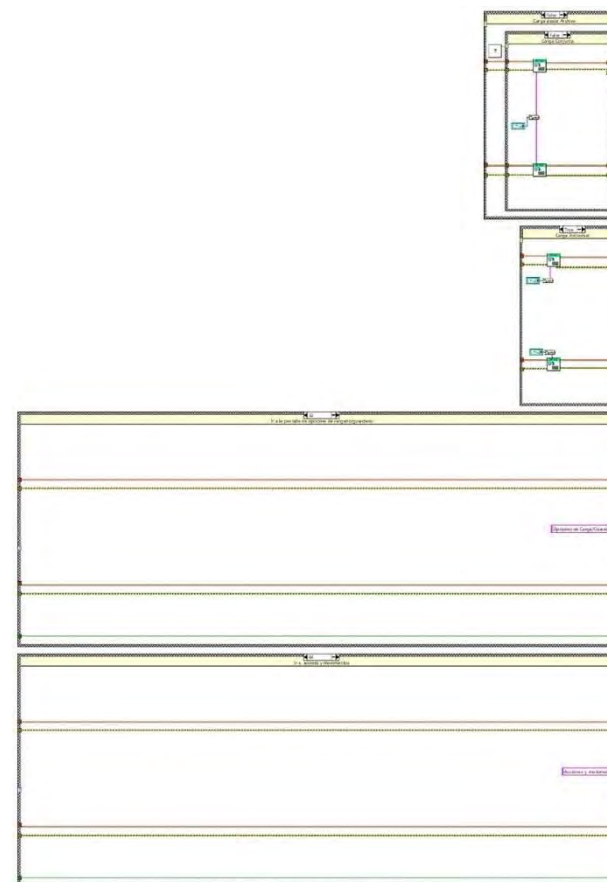
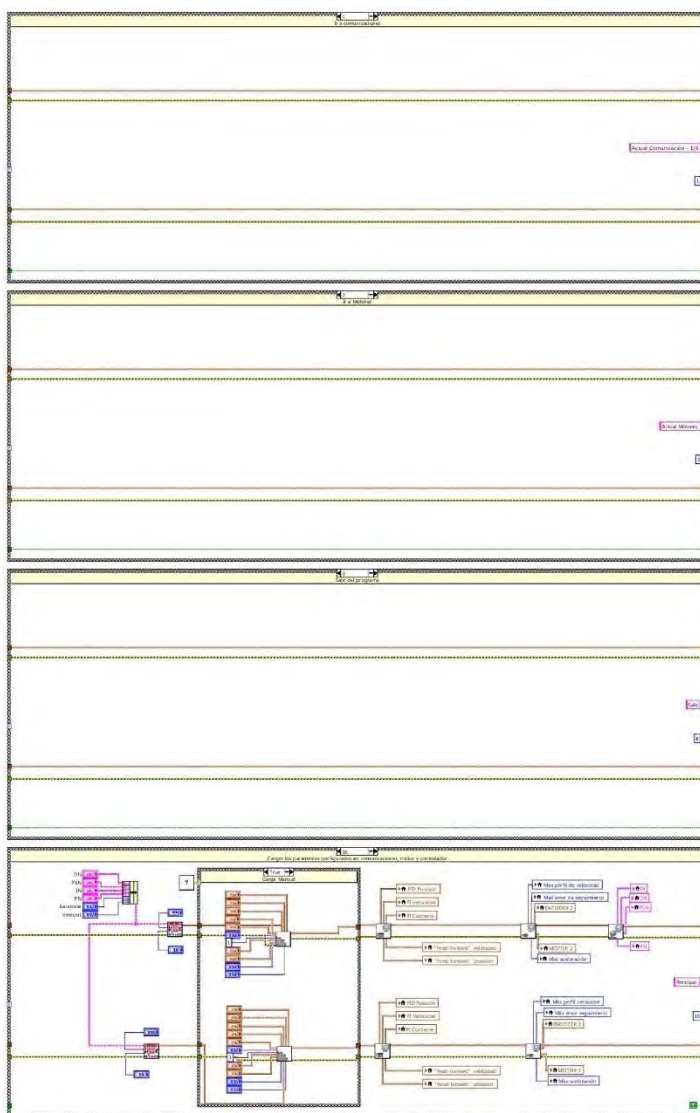
<i>Plano 1: Bucle "Principal"</i>	185
<i>Plano 2: Bucle "Principal"</i>	186
<i>Plano 3: Bucle "Principal"</i>	187
<i>Plano 4: Bucle "Acciones y Movimientos"</i>	188
<i>Plano 5: Bucle "Acciones y Movimientos"</i>	189
<i>Plano 6: Bucle "Acciones y Movimientos"</i>	190
<i>Plano 7: Bucle "Comunicación"</i>	191
<i>Plano 8: Bucle "Controlador"</i>	192
<i>Plano 9: Bucle "Motores"</i>	193
<i>Plano 10: Bucle "Configuración de Sensores"</i>	194
<i>Plano 11: Bucle "Monitoreo de Sensores"</i>	195
<i>Plano 12: Bucle "Opciones de Carga"</i>	196
<i>Plano 13: Bucle "Limpieza de Errores"</i>	197
<i>Plano 14: Bucle "Salir"</i>	198
<i>Plano 15: Bucle "Esclavo"</i>	199

8.4.1 Planos del diagrama de bloques del programa Maestro

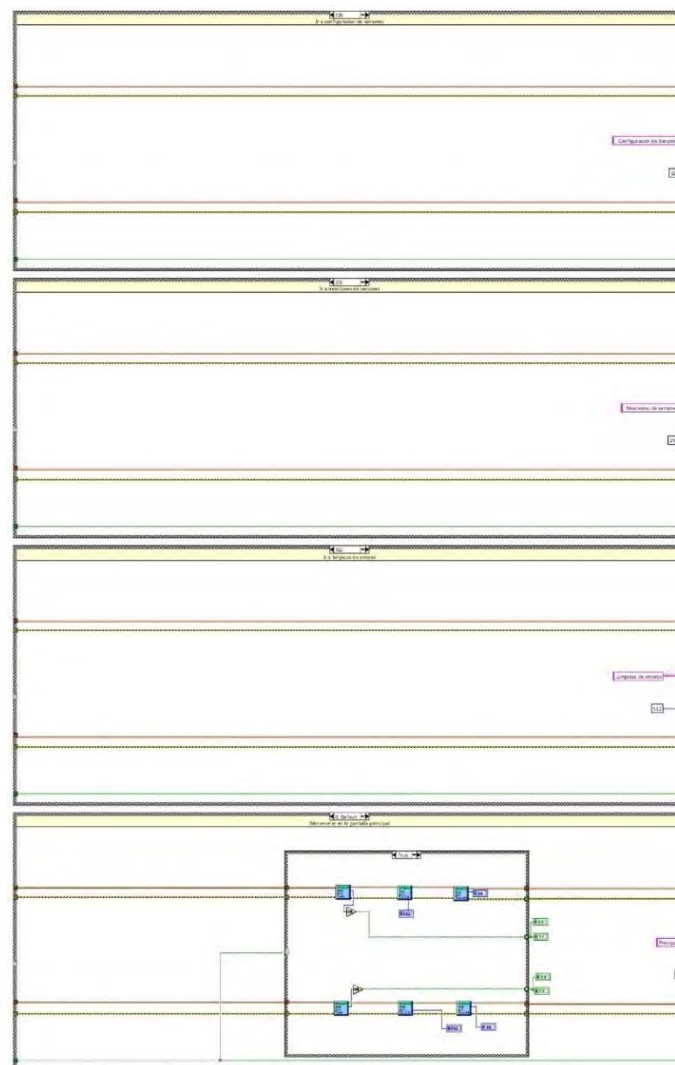
8.4.1.1 Bucle "Principal"



TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO, PRINCIPAL	Código PLANO_MF_1
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UC3M

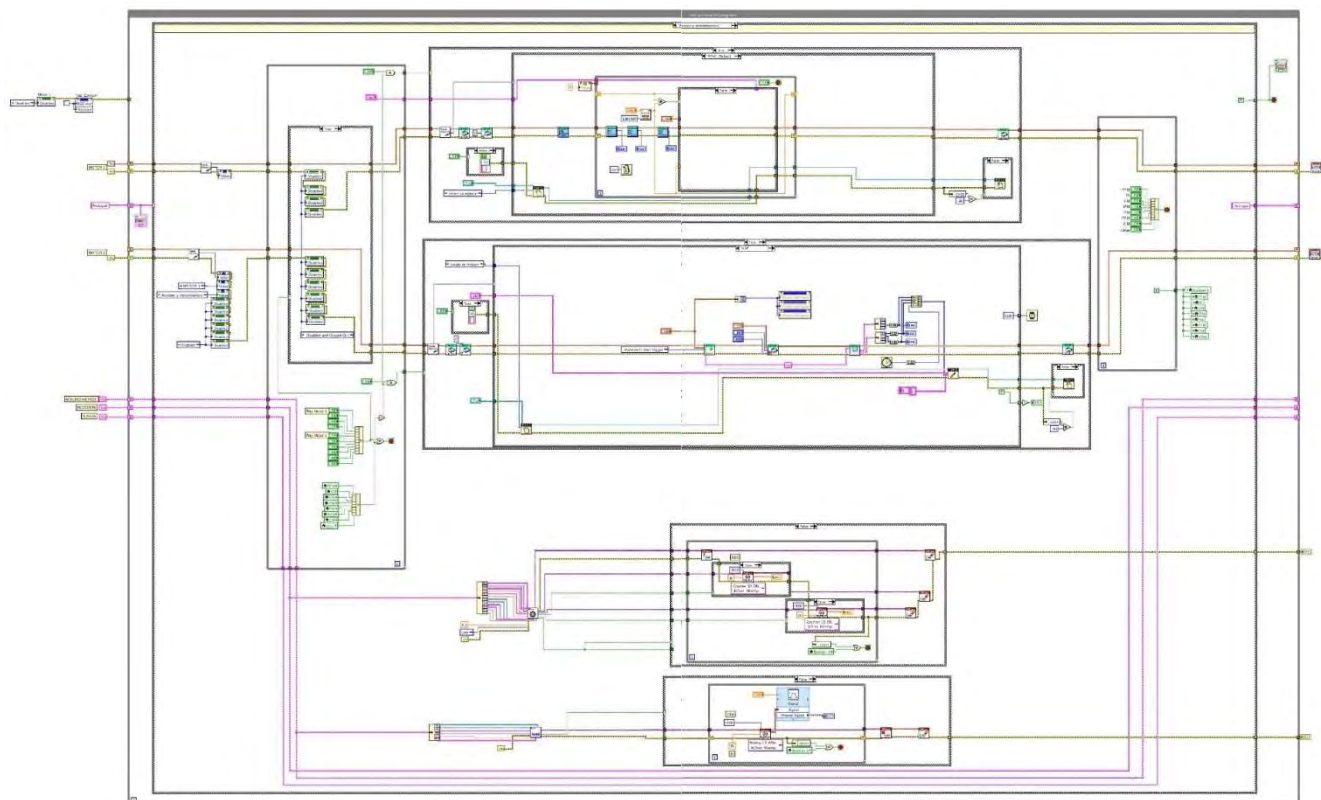


TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES 'MAESTRO' PRINCIPAL	Código PLANO_M.P. 2
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UC3M

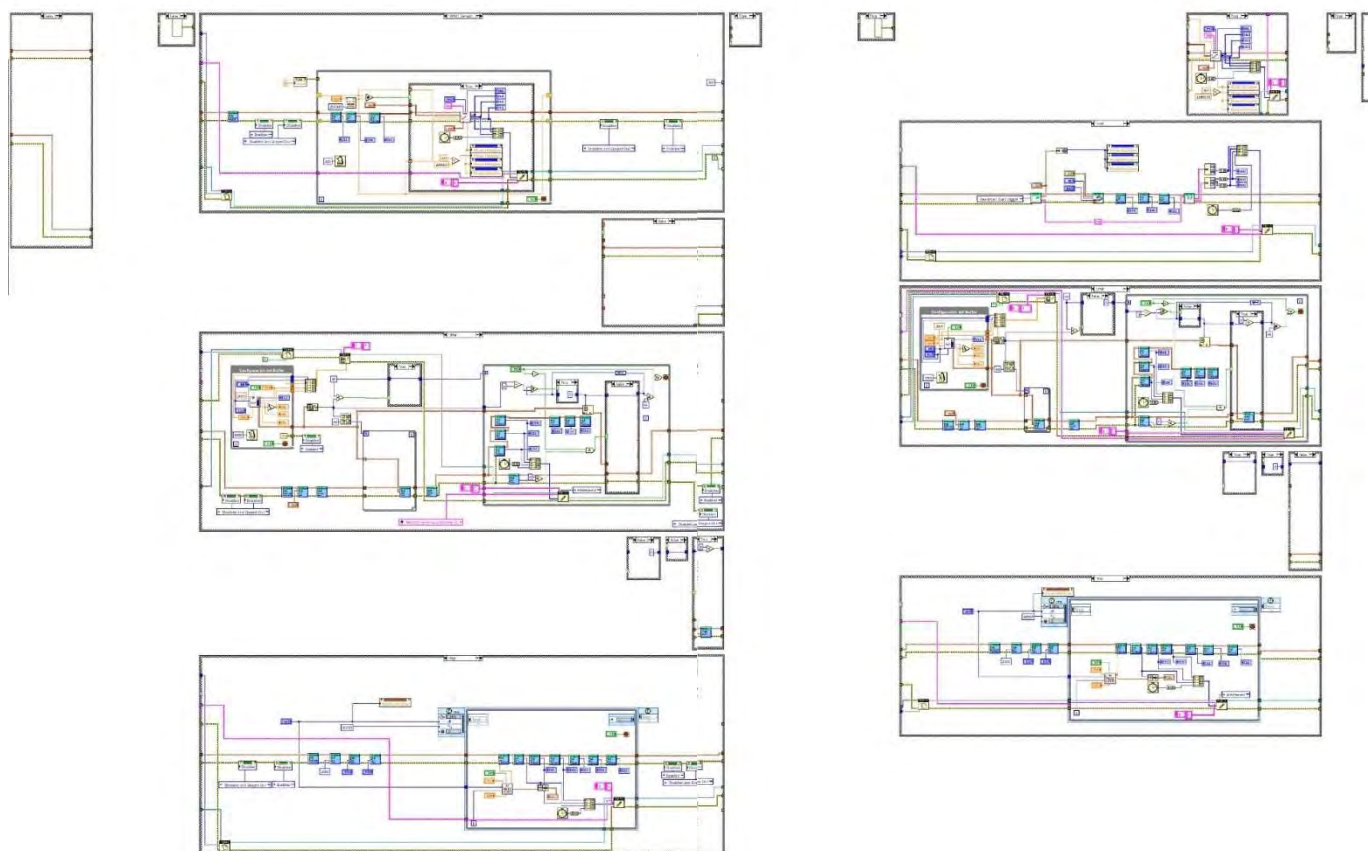


TGF AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES		
Plano	DIAGRAMA ELOQUES MAESTRO, PRINCIPAL	Código PLANO_MCP_3
Auton	LUIS ALEJANDRO MARTIN VELOZA	Universidad UGTM

8.4.1.2 Bucle "Acciones y Movimientos"



TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO ACCIONES Y MOVIMIENTOS	Código PLANO_MAAM_1
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UC3M

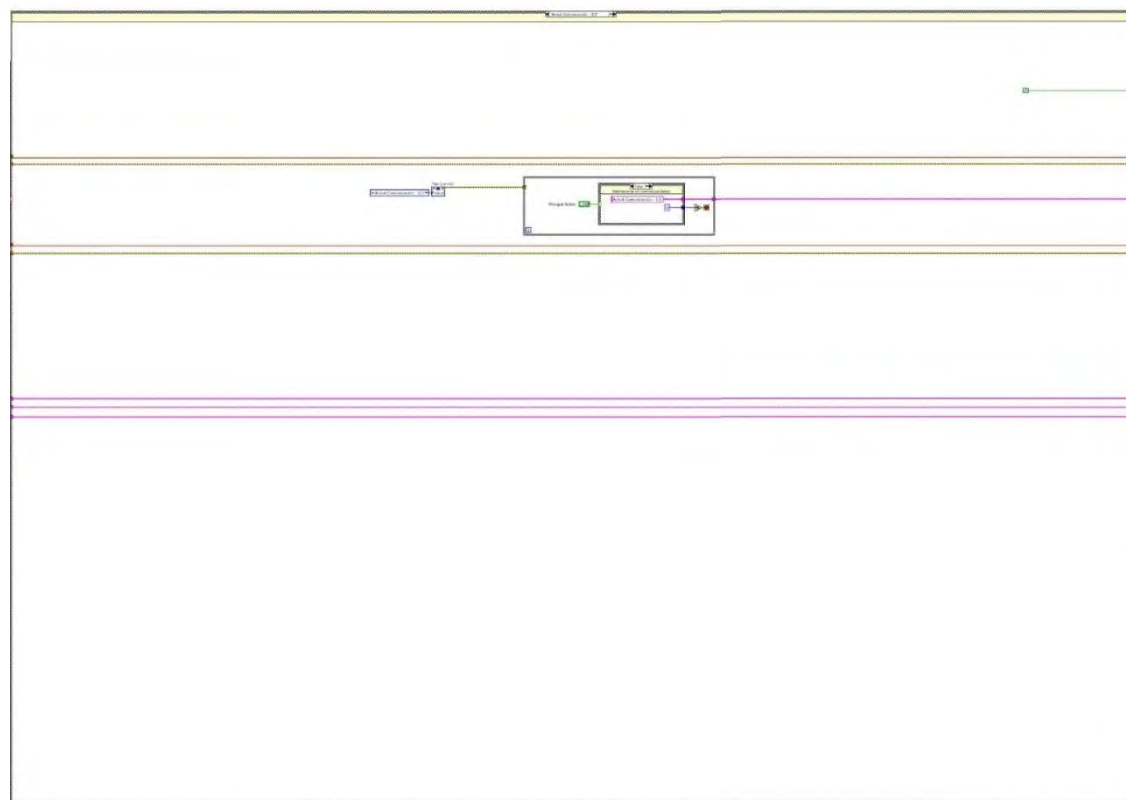


TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO ACCIONES Y MOVIMIENTOS	Código PLANO_MAESTRO_2
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTIN VELOZA	Universidad UC3M



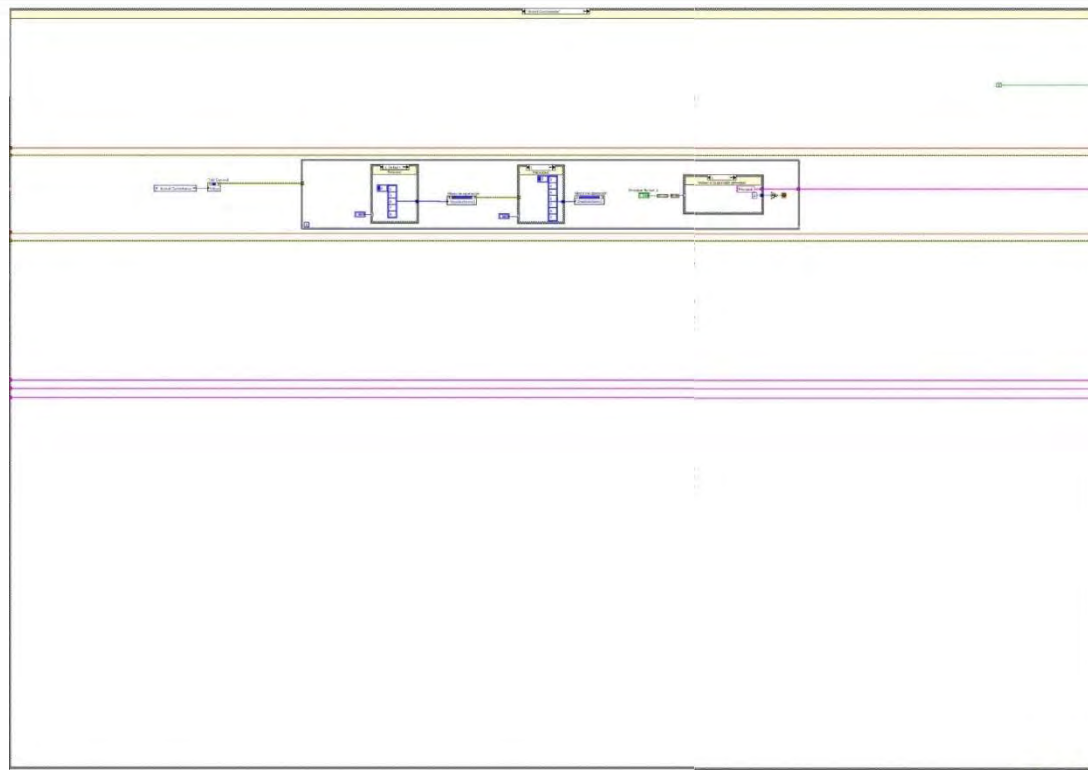
TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO ACCIONES Y MOVIMIENTOS	Código PLANO_MAESTRO_3
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTIN VELOZA	Universidad UC3M

8.4.1.3 Bucle "Comunicación"



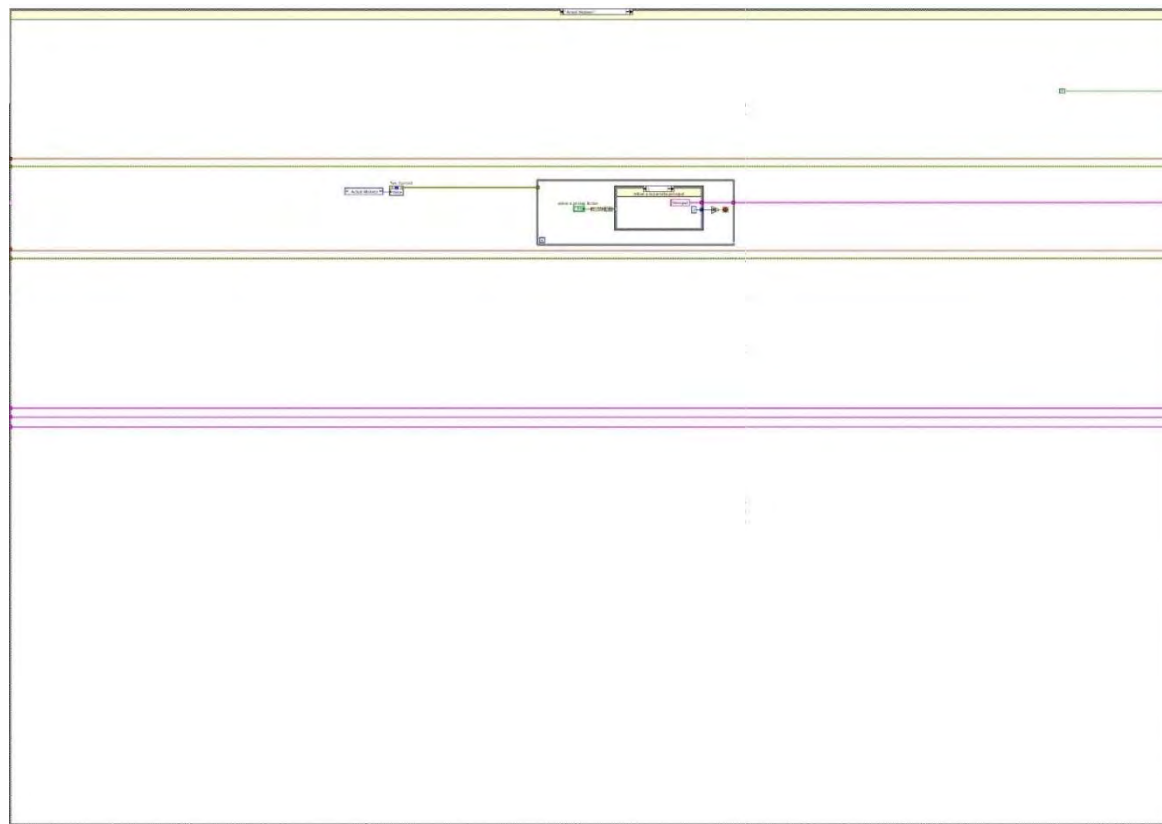
TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO: COMUNICACIÓN	Código PLANO_AUC_i
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UC3M

8.4.1.4 Bucle “Controlador”



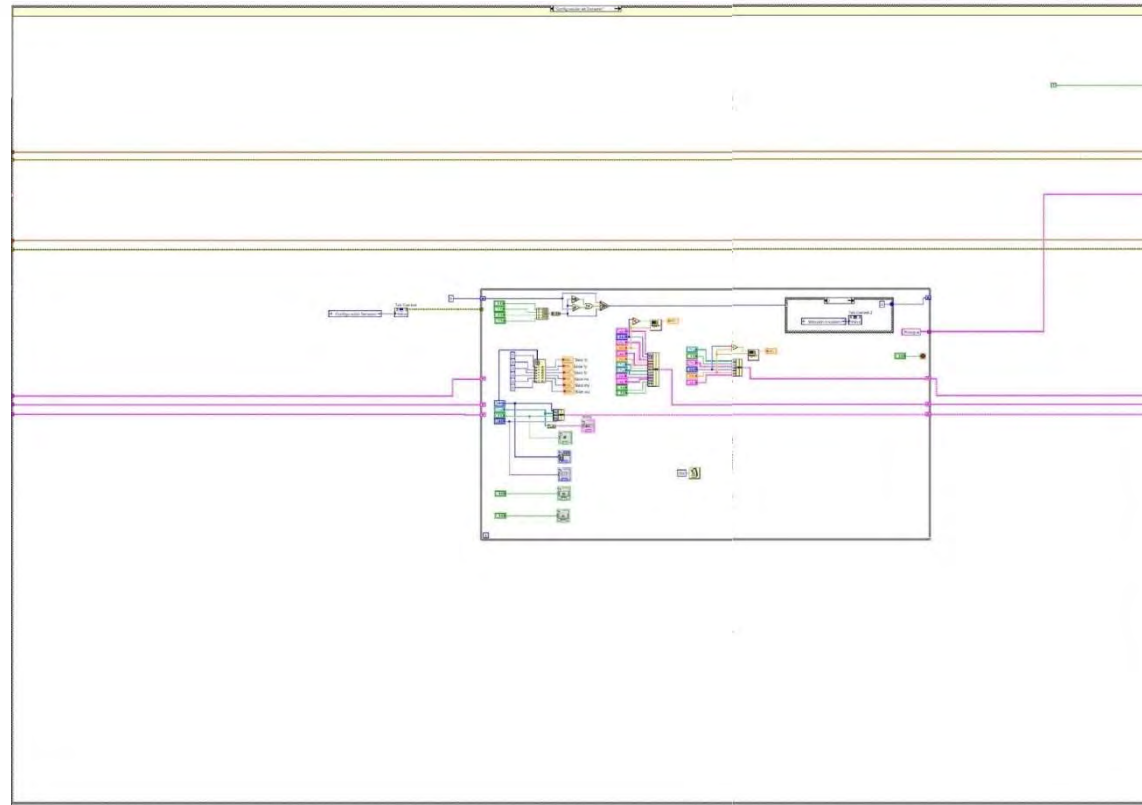
TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO/CONTROLADOR	Código PLANO_MCT_1
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UCRM

8.4.1.5 Bucle "Motores"



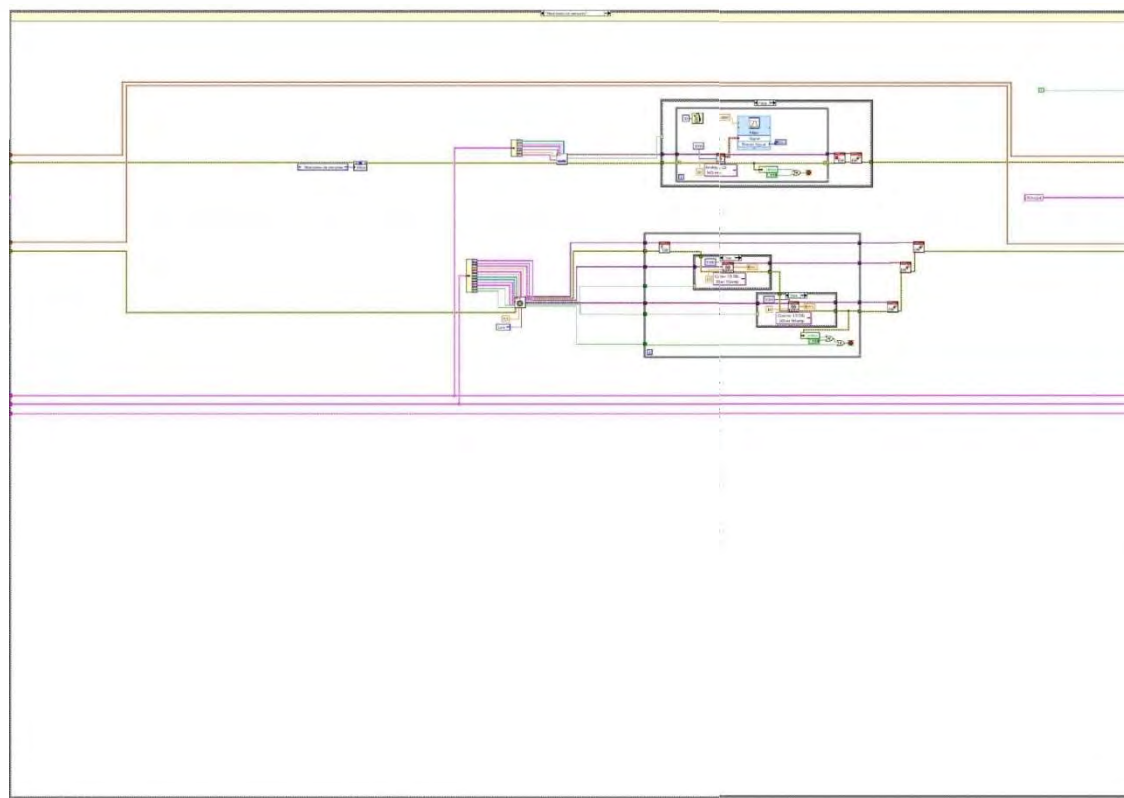
TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO MOTORES	Código PLANO_MMA_1
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UC3M

8.4.1.6 Bucle “Configuración de Sensores”



TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO: CONFIGURACIÓN SENSORES	Código PLANO_MACE_1
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UC3M

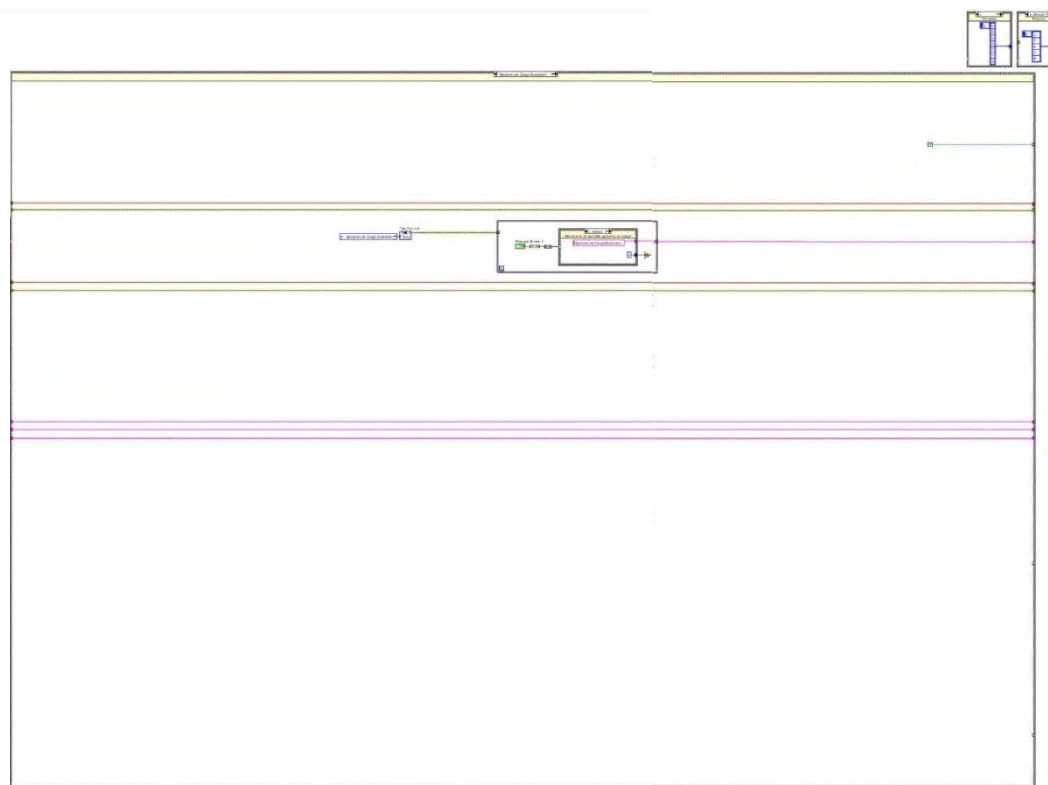
8.4.1.7 Bucle "Monitoreo de Sensores"



TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO/MONITOREO SENSORES	Código PLANO_MCMS_1
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UC3M

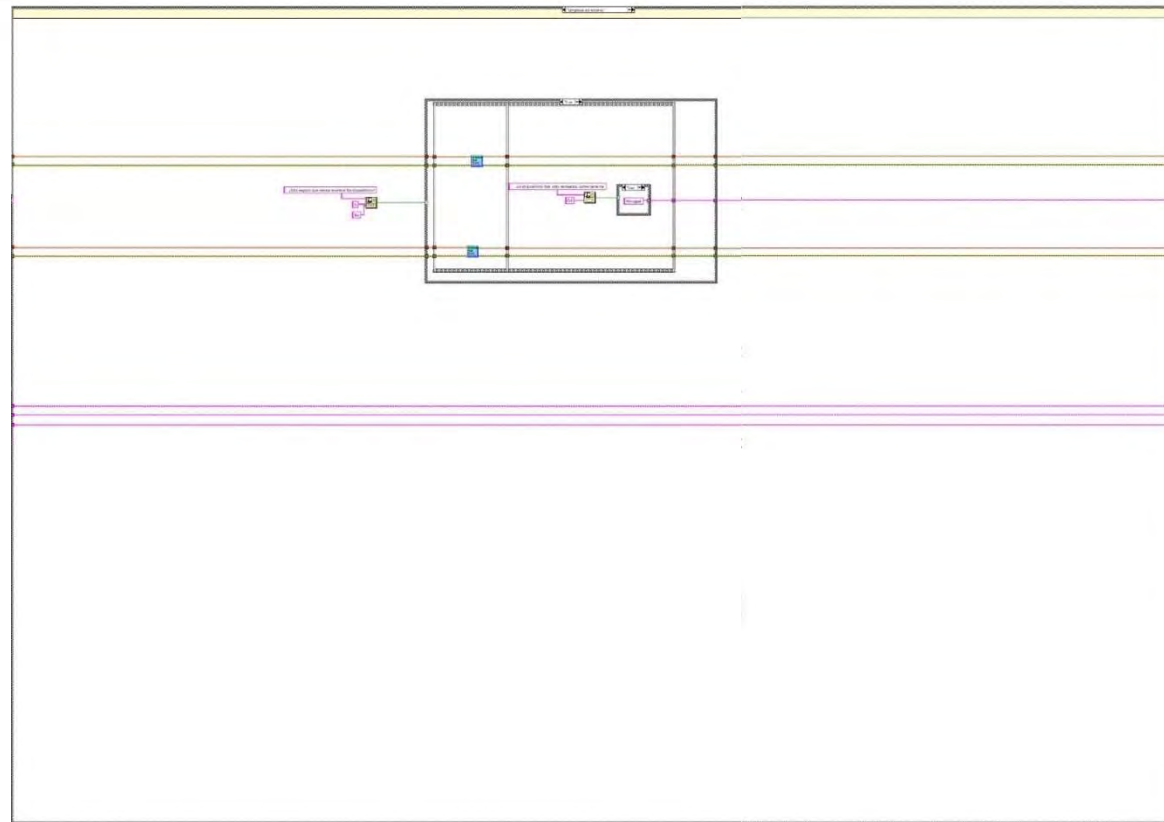


8.4.1.8 Bucle "Opciones de Carga"



TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO: OPCIONES DE CARGA	Código PLANO_MOC_1
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UC3M

8.4.1.9 Bucle “Limpieza de Errores”



TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO: LIMPIEZA ERRORES	Código PLANO_MLE_1
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UC3M



8.4.1.10 Bucle "Salir"



TGF	AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTICULACIONES ROBÓTICAS FLEXIBLES	
Plano	DIAGRAMA BLOQUES MAESTRO-SALIR	Código PLANO_MS_1
Autor	LUIS ALEJANDRO MARTÍN VELOZA	Universidad UCM

8.4.2 Planos del diagrama de bloques del programa Esclavo

